This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

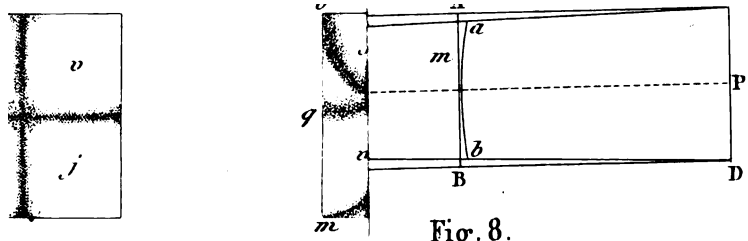


Fig. 8.

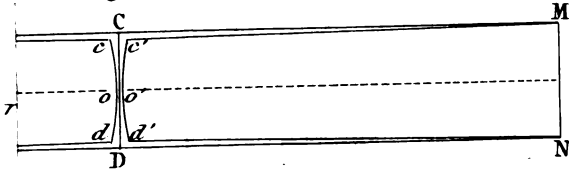


Fig. 10.

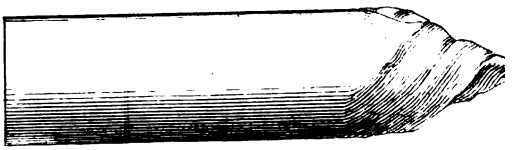
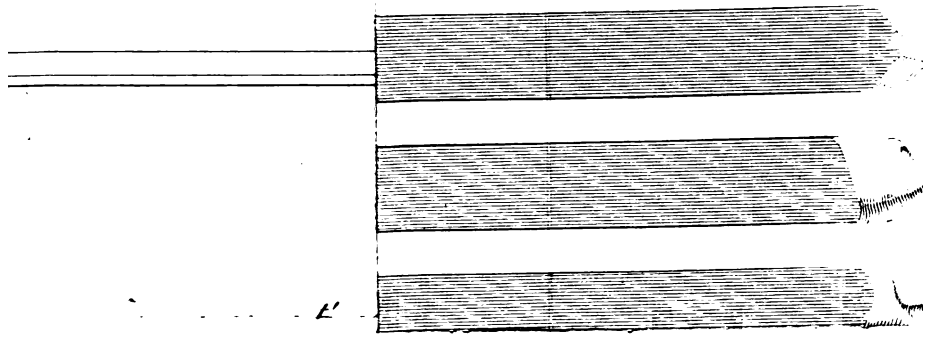


Fig. 11.



Annales de chimie et de physique

Louis Bernard Guyton de Morveau, Joseph Louis Gay-Lussac, François Arago, Michel Eugène Chevreul, Marcellin Berthelot, ...

Digitized by Google

Digitized by Google

PAM
ANNALES

Digitized by Google

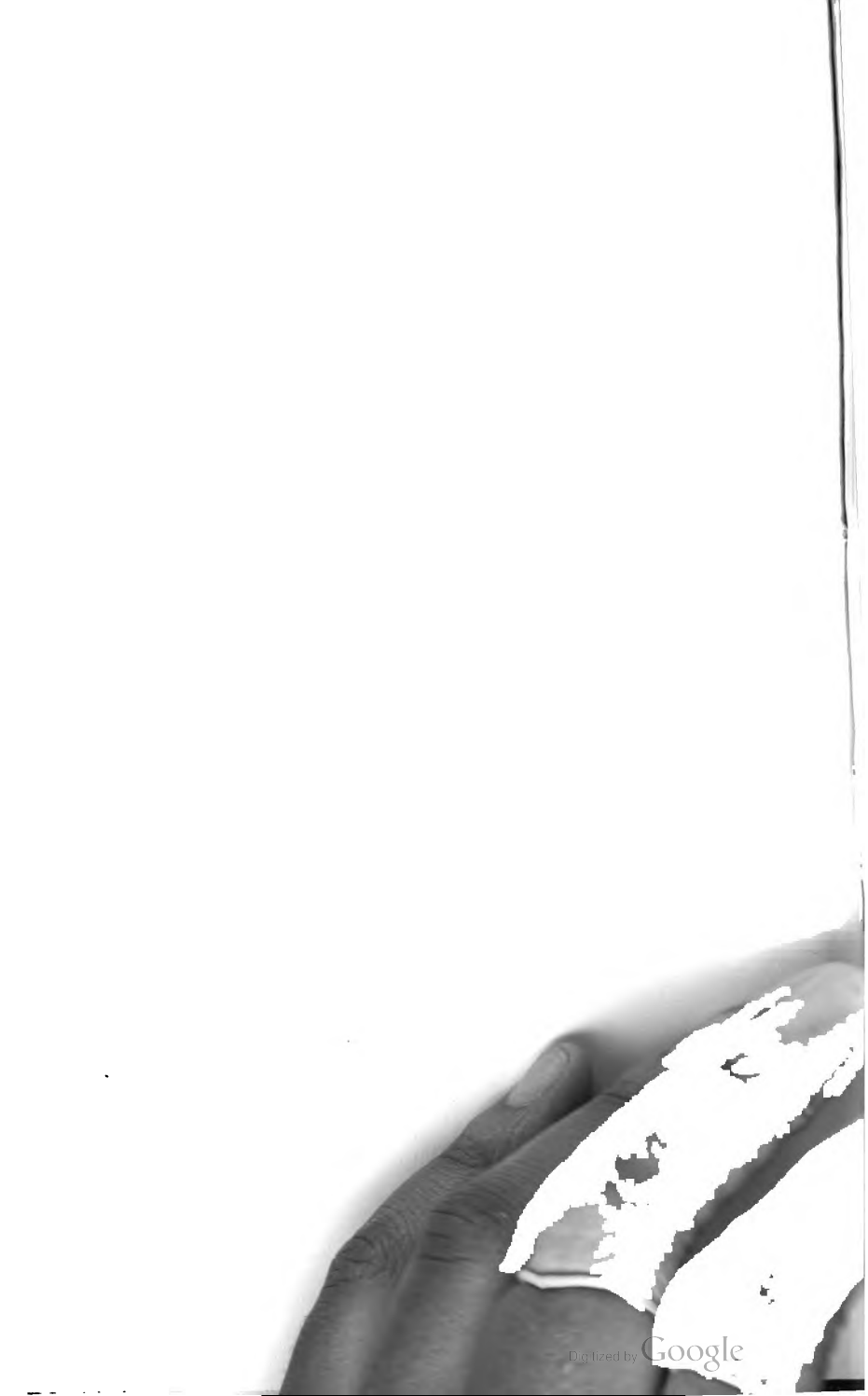
Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Annales
PAH
6 4 6

Digitized by Google


Digitized by Google

Annales
PAR
6#6
Digitized by Google

Digitized by Google

ANNALES

DE

CHIMIE ET DE PHYSIQUE.

TROISIÈME SÉRIE.

1857.

Digitized by Google

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY

ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS
R L

Digitized by Google

ANNALES

DE

CHIMIE ET DE PHYSIQUE.

RECHERCHES

SUR

LE TUNGSTÈNE ET SES COMPOSÉS,

PAR M. ALFRED RICHE,

Docteur ès sciences.

Aperçu historique.

Scheele le premier constata en 1780 que dans un minéral nommé *tungsten*, et qui n'est autre que du tungstate de chaux, il existait un acide particulier; Bergmann pensa qu'il devait renfermer un métal. Les frères d'Elhuyart reconnurent que le wolfram contenait un acide semblable à celui que Scheele avait retiré du premier minéral, et que cet acide pouvait fournir un métal qu'ils nommèrent *wolfram* ou *tungstène*, pour en rappeler les deux origines.

En 1791, parut dans les *Annales de Chimie* un Mémoire sous le titre de *Procédé de MM. Ruprecht et Tondy pour réduire les mines de tungstène et de molybdène.* Les auteurs de ce travail préparèrent l'acide tungstique en attaquant le wolfram par l'eau régale, prouvèrent que ce procédé donnait des produits plus purs que celui de MM. d'Elhuyart, qui fondaient le minerai avec un alcali, et obtinrent du tungstène métallique par la réduction de

Digitized by Google

l'acide tungstique au contact du charbon. Il est curieux de lire les précautions dont ils s'entourèrent pour assurer le résultat de la désoxydation ; le mélange intime d'acide tungstique et de charbon placé dans un creuset de charbon, enfermé dans un creuset d'or protégé lui-même par un creuset de Hesse, était chauffé pendant cinq quarts d'heure dans un violent feu de forge.

Quelques essais furent entrepris successivement par Vauquelin, Hattchett et Bucholz. Sir H. Davy observa la réaction du chlore sur le tungstène ; il constata qu'elle était accompagnée d'une vive incandescence et qu'il se produisait une substance blanche, décomposable par l'action de l'eau en acide chlorhydrique et en acide tungstique.

Berzelius fit d'importantes recherches sur la composition des minerais de tungstène, sur son oxyde et ses sulfures, sur la capacité de saturation de l'acide tungstique et la composition des tungstates.

En 1825 parut dans les *Annales de Chimie et de Physique* un travail de M. Wöhler où il annonça l'existence de trois chlorures de tungstène et d'une combinaison remarquable formée par ce métal avec l'oxyde de sodium.

M. Malaguti publia en 1835 dans le même recueil un Mémoire très-intéressant sur quelques composés de tungstène ; il y démontra l'existence d'un oxyde intermédiaire entre le bioxyde de tungstène et l'acide tungstique, et établit la véritable constitution du produit obtenu par M. Wöhler en faisant réagir l'hydrogène sur le bitungstate de soude.

Ce travail m'a été d'un grand secours, et j'y ai puisé d'excellents renseignements. Toutes les analyses qui y sont données ont été faites avec les soins les plus scrupuleux et sont d'une exactitude parfaite.

Enfin les derniers travaux sur l'acide tungstique et les tungstates sont dus à MM. Margueritte et Persoz et à Laurent.

M. Margueritte montra que les tungstates pouvaient dans

Digitized by Google

certaines conditions dissoudre une nouvelle quantité d'acide tungstique. Mais, comme plus le sel devenait acide, plus il devenait soluble, contrairement à ce qui se passe à l'ordinaire, et comme d'ailleurs les acides minéraux n'en précipitaient plus l'acide tungstique, il fut amené à penser qu'il y avait dans ces sels divers hydrates d'acide tungstique et que l'eau y jouait le rôle de base. C'est donc lui qui le premier prépara les sels contenant un hydrate soluble.

Laurent mit hors de doute la vérité des faits avancés par M. Margueritte, et M. Persoz, en indiquant un mode particulier de préparation de quelques tungstates et d'un hydrate tungstique soluble, vint corroborer les idées de ces deux chimistes.

Préparation du tungstène.

On a proposé plusieurs moyens de préparation du tungstène; le plus ancien et le plus simple consiste dans la réduction de l'acide tungstique par le charbon. Il exige une température très-élevée et très-longtemps soutenue; le mélange de l'acide et du charbon pour être intime demande une longue manipulation, à raison de la grande différence entre les densités des deux substances; il ne donne que le cinquième du métal que l'on doit obtenir, soit parce que la réaction entre ces deux corps solides reste toujours incomplète, soit parce que dans les lavages et la séparation du charbon on entraîne beaucoup de tungstène. Enfin ce métal n'est jamais pur; il reste toujours allié avec une partie du charbon employé.

Klaproth a indiqué un procédé qui consiste à traiter une dissolution de tungstate d'ammoniaque par le zinc; j'ai répété cette expérience plusieurs fois, mais toujours en vain. Le zinc ne réduit nullement le tungstène du tungstate d'ammoniaque (même après un contact prolongé durant quinze jours et une agitation fréquente), et la liqueur, loin de déposer une poudre noire ou brune, reste parfaitement limpide.

Digitized by Google

Le seul mode de préparation qui me paraisse devoir être employé est la réduction de l'acide tungstique par l'hydrogène.

Si on dirige ce gaz sec dans un tube de porcelaine luté contenant de l'acide tungstique, et qu'on chauffe au rouge pendant deux heures au moins, on obtient une matière qui ne contient plus d'oxygène et qui constitue le métal à l'état de pureté, si l'acide tungstique a été préparé avec les soins convenables.

L'hydrogène n'était pas desséché par de l'acide sulfurique, comme on le fait souvent à tort dans les laboratoires, car il se forme toujours dans ce cas une certaine quantité d'acide sulfureux, mais au moyen de deux flacons remplis de chaux sodée réduite en menus fragments. C'est une erreur de croire, comme on l'a dit, que la température n'ait pas besoin d'excéder celle que les vases de verre peuvent supporter: elle doit au contraire être fort élevée, sans quoi le tungstène produit renferme toujours une certaine quantité d'oxydes inférieurs et ne se présente pas avec la teinte grise et l'aspect cristallin qui le caractérisent à l'état de pureté. Si la température a été moins élevée, si par exemple on a fait l'opération dans un tube en verre, on obtient une poudre brune qui est le bioxyde de tungstène impur ou une matière de couleur noirâtre qui est un oxyde inférieur. J'ai constaté plusieurs fois que la substance préparée dans ces conditions renfermait de l'oxygène, car, en la chauffant au rouge vif, il s'en dégageait de nouveau de l'eau, tandis qu'à une température inférieure l'hydrogène passait tout à fait sec.

On a recommandé une modification à ce procédé, qui consiste à remplacer l'acide tungstique par le bitungstate de potasse, c'est-à-dire par une dissolution d'acide tungstique dans le tungstate de potasse; il y a bien un avantage: la réduction est plus facile, ce qui tient, comme on l'a dit, à ce que le sel neutre agit à la manière d'un flux; cependant je ne pense pas qu'on doive se servir de ce mode d'opérer, et

Digitized by Google

cela pour plusieurs raisons. Sous l'influence de la chaleur le bitungstate fondu entre en ébullition et est projeté au dehors de la nacelle qui le contient ; il coule alors dans le tube, le casse assez souvent, et si cet accident n'arrive pas, la nacelle reste attachée au tube qu'il faut briser pour en retirer le tungstène ; de plus, ce métal est incrusté dans les parois à la faveur de la matière fusible qui résulte de l'action du tungstate de potasse sur la couverte de la porcelaine, et on en perd ainsi une portion considérable ; enfin, quand on est parvenu à grand'peine à retirer la matière, il faut la laver longtemps, car elle est souillée par l'excès de tungstate de potasse qui, agrégé sous l'influence de la chaleur, ne se dissout plus qu'avec lenteur ; de telle façon qu'on n'obtient en définitive qu'une faible quantité d'une matière non cristalline et tout à fait dépourvue d'éclat métallique.

Il est un dernier moyen que j'ai dû essayer, c'est celui qui naguère a si bien réussi à MM. Wöhler et H. Deville, et qui a pour base l'action du chlorure de tungstène sur le sodium.

Je commençai par me procurer la matière rouge connue sous le nom de chlorure de tungstène, et je la dirigeai en vapeur sur du sodium chauffé dans un tube en verre rempli de gaz hydrogène.

La réaction eut lieu ; une matière métallique brillante se déposa sur les parois du tube, mais en très-faible proportion, tandis qu'une grande quantité d'eau se dégageait malgré les précautions multipliées prises pour dessécher l'hydrogène : c'est ce fait qui m'amena à penser que le prétendu chlorure n'était qu'un oxychlorure, fait sur lequel j'aurai à revenir bientôt. Je m'occupai alors de préparer un véritable chlorure de tungstène, et quand j'eus atteint ce but, je dirigeai le chlorure pur sur du sodium chauffé ; je n'obtins encore que de très-petites quantités d'une matière déposée en couche brillante sur les parois du tube, mais il

Digitized by Google

se forma une poudre brune abondante que je purifiai par des lavages. C'est du tungstène pur, mais qui n'a pas l'éclat du métal réduit au moyen de l'hydrogène, et ne présente aucune texture cristalline. Il est au tungstène préparé par l'acide tungstique ce que le silicium et le bore pulvérulents sont au silicium et au bore cristallisés.

Équivalent du tungstène.

Suivant quelques auteurs, l'équivalent du tungstène serait représenté par 96, et suivant d'autres par 92 : j'avais tout lieu de croire que ce dernier nombre était encore trop élevé, parce que dans cette détermination on se servait d'acide tungstique préparé au moyen du carbonate de soude qui retient toujours des traces d'alcali et qu'on chauffait fort peu le tube où s'opérait la réduction; et nous avons vu que dans cette circonstance la désoxydation n'était jamais complète. Ces deux causes d'erreur concouraient dans le même sens à fausser l'analyse en augmentant le chiffre trouvé pour équivalent du métal; aussi mes essais montrent-ils qu'il doit être réduit de 92 à 87.

Quant à moi, j'ai employé de l'acide tungstique préparé directement par l'action de l'eau régale sur le wolfram; cet acide lavé, saturé par l'ammoniaque, a donné un tungstate parfaitement cristallisé dont on a rejeté l'eau mère; le sel a été calciné après une nouvelle cristallisation, et c'est l'acide tungstique résultant qu'on a employé d'abord pour déterminer l'équivalent.

J'ai voulu vérifier ces résultats avec un acide tungstique préparé différemment, afin de me mettre à l'abri de toute erreur, et j'ai donné la préférence à l'acide précipité par l'eau de l'oxychlorure de tungstène. A cet effet, j'ai fait passer un courant de chlore sur l'acide tungstique, et j'ai traité par l'eau la matière obtenue; l'acide tungstique formé s'est déposé dans un vase à précipité et a été lavé tant que l'eau a passé acide. Après quoi il a été calciné et employé.

Digitized by Google

Je me suis toujours basé sur la réduction par l'hydrogène de l'acide tungstique dont la formule TuO^3 est généralement admise.

L'hydrogène lavé dans l'eau, desséché par son passage à travers une solution de potasse à 45 degrés et de la chaux sodée concassée en menus fragments, traversait un tube chauffé au rouge rempli de cuivre pur (dans le but de fixer l'oxygène entraîné et de détruire les composés volatils que l'hydrogène forme avec le charbon et l'arsenic). De là, le gaz, après s'être desséché une dernière fois, se rendait dans un tube de porcelaine qu'on chauffait au rouge, après y avoir introduit des nacelles renfermant un poids connu d'acide tungstique.

Voici les nombres de mes cinq déterminations :

1°. Acide retiré du tungstate d'ammoniaque calciné.

I. $0^{gr},278$ d'acide tungstique ont donné 0,218 de tungstène métallique.

II. $1^{gr},340$ d'acide tungstique ont fourni 1,051 de tungstène.

2°. Acide retiré du chlorure.

III. $1^{gr},280$ d'acide tungstique ont produit 1,004 de tungstène.

IV. $0^{gr},289$ ont donné 0,227 de tungstène.

V. $0^{gr},578$ d'acide tungstique ont produit 0,452 de tungstène.

Si nous rapportons à 3×8 d'oxygène les quantités de tungstène trouvées dans ces cinq analyses, nous arrivons aux nombres suivants :

I.	Tu.....	87,20
II.	Tu.....	87,87
III.	Tu.....	86,89
IV.	Tu.....	86,09
V.	Tu.....	87,30

J'ai admis pour équivalent du tungstène le nombre 87, moyenne de mes analyses. Je ne donne pas ce chiffre comme définitif, car il s'agit d'un équivalent élevé, mais comme

Digitized by Google

se rapprochant plus de la vérité que ceux qu'on avait admis jusqu'ici.

Si j'ai agi sur des poids de matière très-faibles, c'est qu'en employant des quantités plus fortes la réduction eût été incomplète.

Propriétés du tungstène.

Le tungstène obtenu par l'action de l'acide tungstique sur l'hydrogène est en petits grains cristallins très-nets, isolés les uns des autres, brillants, susceptibles de prendre un beau poli par le frottement et rayant le verre avec facilité.

Placé dans un feu de forge assez violent pour que les creusets qui le contiennent soient déformés, il reste à l'état solide, et si je suis parvenu à le fondre, c'est grâce à M. Despretz; ce savant professeur a bien voulu, non-seulement me prêter le concours de ses lumières durant ces longues recherches, mais encore mettre à ma disposition la puissante pile de la Faculté des Sciences. Il m'a fallu pour fondre le tungstène 200 éléments Bunsen ordinaires; dans ces conditions une portion très-notable du métal s'oxyde et donne une flamme bleu-verdâtre qui, projetée dans l'obscurité sur un écran blanc, présente de très-belles teintes se rapprochant de celles que donne le zinc dans les mêmes circonstances. Il fond pareillement et très-vite à la chaleur produite par le chalumeau à gaz oxygène et hydrogène; mais là encore la majeure partie du métal s'oxyde et disparaît en fumées d'acide tungstique. Je pensai alors, pour éviter cette perte, à me servir de creusets en charbon; mais on tombe alors d'un écueil dans un autre, car le métal se carbure et devient cassant. Le creuset en chaux ou en alumine n'est pas préférable : au contraire, car outre la perte due à l'oxydation, il s'en fait une autre plus grande par suite de la combinaison de l'acide tungstique à la chaux ou à l'alumine.

La densité de ce métal fondu est de 17,2.

Digitized by Google

Je pensai à me servir, pour le rendre cohérent, des procédés employés à la fabrication des objets en platine. N'ayant pu en obtenir un cylindre par la compression, et craignant que l'insuccès eût pour principale cause mon peu d'habitude dans cette sorte de travail, j'eus recours à M. Chapuis, fabricant de platine, qui ne négligea rien pour conduire l'expérience à bonne fin ; son habileté bien connue fut en défaut et ses essais aussi infructueux que ceux que j'avais tentés moi-même. Le métal s'oxydant à une température élevée, il faut d'abord le chauffer à l'abri de l'air, ce qui rend l'opération d'une exécution difficile. On parvient, il est vrai, à l'agglomérer sous une pression assez faible ; mais quand la compression est plus énergique, il se brise, et on ne peut l'amincir et en façonner un disque ou une lame.

Comme en résumé le tungstène ne s'obtient en abondance qu'à l'état cristallisé, j'ai laissé de côté l'étude de ce corps fondu ou agrégé par la pression, pour déterminer avec soin les propriétés du tungstène cristallisé.

L'oxygène sec, l'oxygène humide, sont sans action sur lui à la température ordinaire, même après un contact de huit mois ; mais à une température rouge, il brûle et donne par la combustion de l'acide tungstique parfaitement débarrassé d'oxydes inférieurs ; à l'air, la chaleur doit être plus forte, mais le résultat est le même.

Le soufre en fusion n'excerce pas sur lui une action rapide ; en effet, j'ai fait tomber ce métal dans un matras en verre contenant du soufre bouillant, et je n'ai constaté aucun phénomène de lumière et de chaleur : les grains cristallins de tungstène se promenaient inattaqués dans le soufre liquide, et ce n'est qu'au bout de quelque temps que la sulfuration s'est opérée.

Il ne brûle pas dans le chlore sec à la température ordinaire, mais la chaleur nécessaire à la combinaison de ces deux corps est bien moindre que celle qu'exige l'oxygène pour réagir sur lui. L'attaque a lieu vers 250 ou 300 degrés ;

Digitized by Google

si l'air et l'humidité sont soigneusement expulsés de l'appareil, il se forme du chlorure de tungstène $Tu\,Cl^3$; s'il reste un peu d'oxygène ou de vapeur d'eau, c'est de l'oxychlorure rouge $Tu\,Cl^2O$, de l'oxychlorure jaune, $Tu\,Cl\,O^2$, ou même de l'acide tungstique $Tu\,O^3$ qui prennent naissance. La réaction de ces deux corps est accompagnée d'un éclat très-vif et d'une forte explosion, si l'on agit sur une quantité de matière un peu considérable.

Le brôme produit dans des circonstances identiques des corps correspondants, c'est-à-dire un brômure, quand on se place à l'abri de l'air, ou des oxybrômures au contact de cet agent.

L'iode se combine encore au tungstène ; mais ici, comme toujours, l'affinité déjà décroissante du chlore au brôme est devenue tellement faible, qu'il est nécessaire de recourir à des vases supportant des températures élevées et que les composés iodés ne se produisent qu'en faible quantité.

J'ai dit à propos de la préparation du tungstène que le charbon s'y unissait assez facilement pour qu'on ne pût faire usage de creusets en plombagine lorsqu'on doit fondre ce métal ; j'ai constaté en effet la présence du charbon dans des grains de tungstène fondus dans du charbon ; ils se brisent au reste avec beaucoup plus de facilité que ceux qui avaient été obtenus dans les creusets en alumine mis à ma disposition par M. Deville.

L'eau bouillie ou aérée, distillée ou ordinaire, ne paraît pas l'attaquer, même au bout de plusieurs mois ; on peut remarquer seulement que le métal s'est légèrement terni à la surface, mais il n'y a pas traces d'oxyde bleu formé. Quand on fait passer de l'eau sur ce métal chauffé au rouge dans un tube de porcelaine, il est très-rapidement oxydé, et il se forme une matière verdâtre, mélange d'acide tungstique et d'oxyde bleu de tungstène.

Si l'on remplace l'eau pure par une eau faiblement alcalisée, le métal, au lieu de se ternir, reste parfaitement

Digitized by Google

transparent, et à la longue on constate qu'une très-faible quantité de tungstène est entrée en dissolution. Cette action, si lente dans ces conditions, devient assez rapide si l'on emploie une dissolution de potasse concentrée et bouillante, et il se forme bientôt du tungstate de potasse en proportion considérable. J'ai cherché maintes fois à recueillir l'hydrogène produit dans cette circonstance et je n'ai jamais pu y parvenir, mécompte qui m'avait au reste toujours frappé, lorsque dans les cours il s'agissait de prouver que l'étain et l'antimoine décomposent l'eau en présence des alcalis.

L'acide azotique chauffé change ce métal en acide tungstique; cette action n'est terminée qu'après quelques jours, tandis qu'elle s'accomplit immédiatement avec de l'eau régale. L'acide sulfurique et l'acide chlorhydrique ne réagissent sur lui qu'avec lenteur; il y a cependant attaque, car la coloration bleue de la liqueur devient bientôt manifeste.

Le sulfure de carbone dirigé en vapeurs sur le tungstène l'attaque faiblement, et donne naissance à une poudre noire qui est du bisulfure de tungstène TuS^2.

Chlorures de tungstène.

On a admis jusqu'à présent l'existence de trois chlorures; l'un, de couleur jaune, s'obtenait en chauffant de l'oxyde de tungstène noir dans le chlore et était nommé le trichlorure de tungstène $TuCl^3$; un deuxième, rouge cinabre, qui se formait par la réaction du tungstène métallique sur le chlore, avait pour formule $TuCl^2$; enfin on en connaissait un troisième, d'un très-beau rouge, dont la composition était indéterminée.

Il existe en effet trois composés renfermant du chlore et du tungstène, mais deux d'entre eux sont des oxychlorures analogues à l'acide chlorochrômique.

Le chlorure n'est pas rouge, mais il présente une teinte de bronze un peu violette; il doit être représenté par la

Digitized by Google

formule

$$Tu\,Cl^3.$$

Ce composé n'avait jamais été isolé; on lui donnait naissance, il est vrai, quand on chauffait le tungstène dans le chlore; mais comme on ne se mettait qu'imparfaitement à l'abri de l'humidité, il se changeait partiellement en oxychlorure rouge, ce qui a fait supposer qu'il avait la teinte du cinabre. Les analyses de ce corps en partie décomposé devaient nécessairement conduire à une formule inexacte, indiquer moins de chlore qu'il n'en contient réellement et par suite tendre vers la formule

$$Tu\,Cl^2.$$

L'un des oxychlorures est rouge et a une composition représentée par le symbole

$$Tu\,Cl^2\,O.$$

C'est la substance dont on ignorait la constitution.

L'autre oxychlorure, qui a pour formule

$$Tu\,Cl\,O^2,$$

était connu sous le nom de *perchlorure de tungstène,* et on lui assignait, sans en avoir fait l'analyse, la formule

$$Tu\,Cl^3.$$

En résumé, nous rencontrons ici une série aussi simple que régulière de corps offrant le même arrangement moléculaire; dans l'un, pris pour type, il y a trois molécules de chlore auxquelles peuvent se substituer une, deux ou trois molécules d'oxygène.

Ces quatre corps sont :

Le chlorure gris.....	$Tu\,Cl^3$;
L'oxychlorure rouge.....	$Tu\,Cl^2\,O$;
L'oxychlorure jaune.....	$Tu\,Cl\,O^2$;
L'acide tungstique.....	$Tu\,O^3$.

Digitized by Google

La théorie des substitutions, à qui l'on doit en chimie organique tant de découvertes intéressantes, trouve ici en chimie minérale une sanction remarquable.

Ce groupe est très-stable; nous verrons plus tard, en effet, qu'on n'obtient que par des moyens détournés les oxydes inférieurs à l'acide tungstique et que leur conservation presente beaucoup de difficultés; il n'est pas plus aisé de faire des chlorures de tungstène moins chlorurés que Tu Cl^3, et, si je suis parvenu à en obtenir un, ce n'est qu'à grand'peine qu'il m'a été possible d'en préparer de très-petites quantités.

Chlorure de tungstène.

Quand on dirige un courant de chlore sec sur du tungstène métallique porté à une température élevée, sans prendre de précautions particulières, il se dépose à la partie extrême du tube de porcelaine où a lieu la réaction, une masse rouge à l'extérieur, qui a cristallisé après fusion ou après volatilisation. Si on en brise les fragments, on remarque qu'au centre ils présentent d'abord une teinte bronzée qui bientôt passe au violet, puis au rouge pour devenir jaune et garder ensuite indéfiniment cette couleur; dans ces conditions, on a successivement donné naissance aux quatre combinaisons citées plus haut.

Si l'on veut obtenir la première à l'état de pureté, il faut prendre un ensemble de précautions que je vais décrire.

On commence par faire passer un courant d'hydrogène sec dans un tube en porcelaine d'assez fort calibre renfermant 100 grammes environ de tungstène dans la moitié la plus proche du flacon où se prépare le gaz.

Le tube devant être chauffé au coke est luté avec de la terre à four, et placé dans un fourneau à réverbère; le gaz est desséché au moyen de plusieurs flacons de chaux sodée et le tube porté au rouge jusqu'à ce qu'il ne s'en dégage plus d'eau. A ce moment, on retire le feu, après avoir adapté à l'extrémité de l'appareil un tube desséchant pou-

Digitized by Google

éviter la rentrée de l'humidité. Lorsque le fourneau est tout à fait froid, on substitue au dégagement d'hydrogène un dégagement de chlore parfaitement sec et on chauffe légèrement la partie du tube en porcelaine où est le métal. La température atteint à peine le rouge sombre, qu'un bruit produit par l'énergie de la réaction se fait entendre et qu'une fumée abondante de chlorure se dégage. On pousse alors le chlore avec vivacité, et la réaction se continue jusqu'à ce que tout le métal soit attaqué ou jusqu'à ce que le chlorure formé obstrue l'appareil. On retire aussi vivement que possible la matière, à l'aide d'un agitateur en verre, et on la place dans un flacon desséché avec le plus grand soin.

Le chlorure ainsi obtenu est toujours cristallisé, mais il se présente sous deux formes particulières; ce qui tient à la façon dont la cristallisation s'est opérée. La majeure partie du produit est réunie en un anneau dur et épais qui s'est solidifié après fusion et est formé de lames aplaties; mais une faible portion de matière fondue a été sublimée pendant la réaction loin de la partie chauffée, et est devenue solide sans passer par l'état liquide.

Ces cristaux sont de fines aiguilles bronzées que le contact de l'air fait passer au violet lorsqu'on les transvase du tube où la réaction a eu lieu, dans les flacons où on veut les conserver.

Quant à la partie compacte qui représente les $\frac{9}{10}$ en poids du produit, elle prend aussi cette teinte violette à la surface; mais si on casse les fragments, on trouve que le centre possède la couleur bronzée de cette substance à l'état de pureté.

Si on la réduit en poudre et qu'on l'abandonne à l'air, elle bleuit bientôt, et au bout d'un quart d'heure elle est entièrement changée en oxyde bleu.

Quand on en projette un fragment dans l'eau, il se produit un léger sifflement; la liqueur se colore en bleu, mais la matière, très-agrégée par la fusion, ne se réduit en poudre qu'avec lenteur et ne prend pas la teinte jaune qui appar-

Digitized by Google

tient à l'acide tungstique : c'est cette formation d'oxyde bleu qui avait probablement fait donner à ce chlorure la formule

$$Tu\,Cl^2.$$

Il était en effet naturel de supposer que, puisque l'action de l'eau donnait un oxyde inférieur à l'acide tungstique, le chlorure renfermait moins de chlore que l'acide tungstique ne renfermait d'oxygène. Les analyses montrent cependant que ce corps a pour formule

$$Tu\,Cl^3.$$

Je pense que cette formation d'un oxyde inférieur, tient à ce que le trichlorure renferme de petites quantités d'un chlorure moins chloruré dont la décomposition par l'eau donne des traces d'oxyde bleu. Nous verrons plus loin qu'il n'en faut que des proportions infiniment faibles pour teindre l'acide tungstique d'une façon très-sensible.

Ce chlorure, chauffé dans un tube étroit, fond en un liquide noir et se sublime brusquement presque au même instant, ce qui ne permet pas de prendre avec facilité son point de fusion et de déterminer le degré de chaleur nécessaire pour le volatiliser, d'autant plus qu'il s'altère très-vite durant ces manipulations.

Cependant j'ai fixé son point de fusion en me servant de tubes très-étroits en verre, où j'introduisais par aspiration une certaine quantité de la matière fondue; par ce moyen l'air n'agissait que sur une tranche très-mince de chlorure, et ne l'altérait pas sensiblement. Ces tubes étaient chauffés au bain d'huile.

Voici les résultats de deux expériences :

I.	Point de fusion.....	183°,0
	Point de solidification.....	181°,0
II.	Point de fusion.....	183°,4
	Point de solidification.....	180°,0

Digitized by Google

Si on le chauffe à l'air, il fond et s'oxyde aussitôt avec violence en répandant d'épaisses fumées.

Ce chlorure est formé de :

1 équivalent de tungstène Tu....	87	44,62
3 équivalents de chlore Cl^3.....	108	55,38
	195	100,00

En effet :

I. $0^{gr},915$ de matière employée ont donné 0,516 d'acide tungstique et 2,021 de chlorure d'argent ou 0,505 de chlore.

II. $1^{gr},492$ de matière employée ont donné 0,858 d'acide tungstique et 3,273 de chlorure d'argent ou 0,819 de chlore.

III. $0^{gr},561$ de matière ont donné 0,327 d'acide tungstique.

Ce qui correspond à :

	I.	II.	III.
Cl.....	55,18	54,89	»
Tu.....	44,15	45,04	44,20
	98,79	99,93	

L'alcool le plus concentré qu'il m'a été possible de préparer, attaque vivement ce chlorure, mais si on distille le liquide obtenu, le point d'ébullition ne s'élève pas au-dessus de 100 degrés, et je n'ai pu constater la formation d'éthers tungstiques correspondants aux éthers siliciques d'Ebelmen.

Bichlorure de tungstène.

Ce corps s'obtient en très-petite quantité quand on dirige un courant d'hydrogène sec sur le chlorure précédent placé dans un tube en verre. On chauffe très-peu, afin de ne pas volatiliser le trichlorure, et on s'arrête quand il ne se dégage plus d'acide chlorhydrique. Il reste un produit brun-noirâtre se décomposant par l'eau en donnant naissance à du bioxyde de tungstène. Ce corps doit avoir pour composition :

$$Tu\,Cl^2.$$

Digitized by Google

Il est fort difficile de rester dans les limites restreintes de température où se produit ce corps : en effet, si on chauffe trop peu, la réaction ne se déclare pas; si au contraire la température est trop élevée, le trichlorure se volatilise et le bichlorure est souillé par du tungstène métallique qui recouvre le tube d'un bel anneau miroitant.

Oxychlorures.

Si on fait passer un courant de chlore sec sur un mélange d'acide tungstique et de charbon, on obtient l'oxychlorure rouge Tu Cl^2 O mêlé d'un peu d'oxychlorure Tu Cl O^2. Pour en préparer de grandes quantités, on calcine à l'abri du contact de l'air un mélange de deux parties d'acide tungstique et d'une partie de charbon, et on place la matière ainsi privée d'eau dans une cornue en grès bitubulée et lutée avec soin ; il est inutile de faire des boulettes avec de l'huile : l'opération réussit parfaitement avec la poudre des deux substances.

On chauffe modérément la cornue dans la tubulure verticale de laquelle arrive un courant rapide de chlore, et quand l'eau provenant de l'appareil cesse de se dégager, on adapte le récipient à l'autre tubulure.

Ce récipient doit être vaste, car le chlorure se produit en abondance et sous forme de flocons très-légers; il doit en outre présenter peu de contact avec l'air, car la matière est des plus altérables.

Pour atteindre ce double but, je me sers d'une grande cloche terminée à ses deux extrémités par des ouvertures assez étroites; l'une d'elles s'applique sur le col de la cornue auquel on la fixe par du lut terreux, et l'autre est mise en communication avec un tube dessiccateur qui empêche le retour de l'air humide dans la cloche. Quand celle-ci est remplie ou que le chlorure cesse de se dégager, on détache le lut et on appuie l'ouverture de la cloche sur celle d'un flacon desséché avec le plus grand soin : il suffit alors de don-

Digitized by Google

ner quelques secousses pour que la matière tombe. On évite, par ce moyen, autant qu'il est possible, le contact de l'air, qui fait passer très-rapidement la couleur rouge du produit à la couleur jaune du second oxychlorure ou de l'acide tungstique.

Cependant il s'est toujours formé un peu de ces deux dernières substances ; pour les séparer, on place le mélange impur à la partie antérieure d'un tube en verre blanc assez large, soutenu par une grille en tôle, et on y dirige un courant d'acide carbonique sec.

Il suffit alors d'en approcher quelques charbons pour sublimer l'oxychlorure rouge qui est très-volatil. En chauffant un peu plus, l'oxychlorure blanc se volatilise à son tour. Enfin l'acide tungstique reste seul dans la partie chauffée, de sorte qu'en très-peu de temps on peut isoler dans trois parties du tube ces trois produits et les mettre à part.

Sous l'influence de cette douce chaleur, les oxychlorures se sont sublimés avec lenteur et se présentent parfaitement cristallisés.

L'oxychlorure rouge est en longues aiguilles du plus bel éclat, et l'autre en petites plaques très-distinctes de couleur jaune-citron.

L'oxychlorure rouge laissé à l'air s'altère plus rapidement encore que le chlorure, devient aussitôt jaune et s'entoure de gouttelettes humides dues à la formation de l'acide chlorhydrique. Jeté dans l'eau, il s'y délite instantanément en produisant un sifflement aigu, et il se précipite une poudre très-ténue qui est de l'acide tungstique. Cette action si énergique tient au peu d'agrégation de cette substance formée par sublimation et non par fusion comme le chlorure.

Ce corps fond à 199 degrés et se solidifie à 197°,5 ; la température à laquelle il se volatilise est très-voisine de celle de sa fusion.

Pour en faire l'analyse, j'ai eu recours à l'action décomposante de l'eau.

Digitized by Google

I. $0^{gr},925$ de cet oxychlorure ont donné 0,665 d'acide tungstique.

II. $0^{gr},394$ de cet oxychlorure ont donné 0,264 d'acide tungstique.

III. $0^{gr},788$ de cet oxychlorure ont donné 0,509 d'acide tungstique et 1,352 AgCl ou 0,338 de chlore.

Ce qui correspond, en centièmes, à :

	I.	II.	III.
Tu.....	53,82	52,58	50,51
Cl.....	»	»	42,91

Et l'oxychlorure de tungstène $TuCl^2O$ est formé de :

1 éq. de tungstène Tu...	87	52,09
2 éq. de chlore Cl^2.....	72	43,11
1 éq. d'oxygène O.....	8	4,80
	167	100,00

Ces analyses sont fort délicates, parce que la matière s'altère avec tant de rapidité pendant les pesées, qu'il est impossible d'agir sur la substance à l'état de pureté.

L'action de l'hydrogène sur elle (il se produit de l'eau) prouve qu'elle renferme de l'oxygène, et toute autre formule donne des nombres très-éloignés de ceux que j'ai obtenus.

Le second oxychlorure qui prend naissance dans la réaction précédente se forme presque seul lorsqu'on fait passer le chlore non plus sur un mélange d'acide tungstique et de charbon, mais sur de l'acide tungstique seul. L'appareil est le même au reste, et le mode de rectification identique.

Ce corps est jaune-citron, cristallisé en petites plaques très-minces, décomposable avec lenteur au contact de l'eau et sans produire de bruit appréciable. Il fond et se volatilise à une température plus élevée que le précédent : propriété utile qui nous a permis de l'en séparer.

Digitized by Google

La fusion a lieu à 259 degrés. La solidification s'opère à 256 degrés.

Quand on le sublime dans un tube, il se dépose toujours sur les parois froides à l'état liquide; aussi cristallise-t-il toujours par fusion, tandis que l'oxychlorure rouge passe directement de l'état gazeux à l'état solide.

I. $1^{gr},021$ de ce chlorure ont fourni 0,813 d'acide tungstique.

II. $0^{gr},621$ de chlorure ont donné 0,625 de chlorure d'argent ou 0,156 de chlore.

Ce qui donne, en centièmes :

	I.	II.
Tungstène.....	62,38	»
Chlore.....	»	25,12

Or l'oxychlorure $TuClO^2$ est formé de :

1 éq. de tungstène Tu..	87	62,59
1 éq. de chlore Cl. ...	36	25,89
2 éq. oxygène O.....	16	11,52
	139	100,00

Brômure de tungstène $TuBr^3$.

Le brômure de tungstène s'obtient avec facilité par l'action du brôme sur le tungstène métallique. Le mode d'opérer le plus convenable consiste à placer le brôme dans une petite cornue en verre dont le col est mastiqué dans un tube de porcelaine, au moyen d'un mélange d'amiante et d'argile.

On doit attendre pour volatiliser le brôme que le tube soit au rouge vif, car à une température inférieure la réaction n'aurait pas lieu : pour préparer le chlorure correspondant, il fallait une chaleur bien moindre; de plus, le brômure, beaucoup moins volatil que le chlorure, ne se sublime qu'à une distance très-faible du métal; enfin, l'action du brôme sur le tungstène n'est jamais accompagnée de lumière comme celle du chlore sur le tungstène et ne donne

Digitized by Google

pas lieu à une explosion dans le commencement de la réaction. On recueille sur les parois du tube une matière fondue de couleur marron et des aiguilles sublimées de la même substance présentant des reflets dorés assez remarquables.

Le brômure chauffé dans un tube fond et se sublime brusquement à une température élevée; la matière condensée dans la partie froide s'y dépose d'abord à l'état d'un liquide noir qui cristallise bientôt.

A l'air, il se recouvre d'une substance violette qui est l'oxybrômure $Tu\,Br^3\,O$, et il se dégage d'abondantes vapeurs d'acide brômhydrique; le fragment de brômure ainsi laissé à l'air s'entoure de gouttelettes humides, et bientôt il est entièrement changé en acide tungstique, reconnaissable à sa couleur jaune-verdâtre.

Placé sur une matière organique, il se détruit plus rapidement encore; le bois, le papier, sont tachés de brôme; de l'acide brômhydrique se répand tout autour en fumées épaisses, et il reste de l'oxyde bleu, le corps organique ayant agi comme réducteur.

Jeté dans l'eau, il donne immédiatement naissance à un oxyde vert qui est de l'acide tungstique impur. Un sifflement aigu accompagne cette décomposition.

Iodure de tungstène.

L'action de l'iode sur le tungstène est très-peu énergique; le tungstène ne s'attaque qu'à la surface, et le produit sublimé, souillé d'iode, est difficile à purifier.

Cependant on peut observer qu'il se forme deux substances différentes; l'une est de couleur brune comme le chlorure et le brômure de tungstène : c'est probablement l'iodure correspondant; l'autre est en écailles verdâtres, flottant sur l'eau qui ne la mouille pas: je présume que cette seconde matière est un oxy-iodure correspondant aux oxy-chlorure et oxybrômure étudiés plus haut.

Digitized by Google

Carbure de tungstène.

Le charbon s'unit avec le tungstène, comme on l'a vu plus haut, et le rend encore plus aigre et plus cassant.

Je n'ai pu réussir à combiner le phosphore avec le tungstène.

Sulfures de tungstène.

On a signalé l'existence de deux sulfures de tungstène : l'un est le bisulfure TuS^2, qui prend naissance par l'action de la vapeur de soufre ou d'hydrogène sulfuré sur le métal chauffé au rouge ; l'autre est un trisulfure TuS^3, qui correspond à l'acide tungstique et a été découvert par Berzelius, en faisant réagir cet acide sur l'hydrosulfate d'ammoniaque.

Bisulfure de tungstène.

J'obtiens ce corps avec la plus grande facilité et à l'état de pureté parfaite, par la réaction du soufre sur le bitungstate de potasse, produit dont la préparation est des plus simples et peut se faire directement avec le wolfram.

On mêle avec soin dans un creuset en terre poids égaux de soufre et de bitungstate et on chauffe au coke pendant une demi-heure ; la matière fondue est coulée sur une pierre et réduite en poudre ; on lave celle-ci avec de l'eau chaude et on filtre : il reste sur le papier une matière d'un noir bleuâtre, en cristaux mous et très-fins, s'écrasant sous la plus légère pression, tachant le papier ou la main comme la plus belle plombagine et pouvant se réunir en pains sous une pression modérée. Ce procédé très-commode fournit la quantité théorique de ce sulfure qui trouverait peut-être un emploi dans la galvanoplastie et la fabrication des crayons.

On prépare aussi cette substance en faisant réagir le soufre, l'hydrogène sulfuré, le sulfure de carbone sur le tungstène, ou sur un mélange d'acide tungstique et de charbon ; mais, outre que le rendement est peu considérable, le procédé est très-coûteux, à cause de la température très-

Digitized by Google

élevée et très-longtemps soutenue dont il nécessite l'emploi.

Ces divers modes d'opérer, plus difficilement exécutables que le premier, fournissent la même substance chimiquement parlant, mais au point de vue physique, elle diffère essentiellement; formée sans le contact d'un liquide quelconque, elle est très-agrégée, ne s'écrase qu'avec peine sous les doigts et ne les tache que si la pression est énergique : tandis que, préparée par le moyen que j'ai donné en commençant, elle jouit, je le répète, des propriétés de la plombagine.

Cette substance est tout à fait insoluble dans l'eau; chauffée à l'air, elle brûle en dégageant de l'acide sulfureux. Les analyses de ce corps conduisent à la formule

$$Tu\,S^2.$$

En effet, *produit obtenu dans l'action du sulfure de carbone sur un mélange de charbon et d'acide tungstique :*

I. $0^{gr},262$ de cette substance ont fourni 0,253 d'acide tungstique, sous l'influence de l'eau régale.

II. $0^{gr},160$ de cette même matière réduite dans un courant d'hydrogène ont laissé 0,119 de tungstène métallique.

Ce qui donne, en centièmes :

	I.	II.
Tungstène....	75,05	74,37
Soufre.....	»	»

Or le bisulfure de tungstène est formé de :

1 équivalent de tungstène Tu...	87	73,11
2 équivalents de soufre S^2.....	32	26,89
	119	100,00

Ces nombres étant assez éloignés de ceux que donne la théorie, j'ai fait l'analyse du sulfure formé avec le soufre et le bitungstate, et voici les résultats auxquels je suis arrivé :

Digitized by Google

I. $0^{gr},950$ de matière ont donné 0,889 d'acide tungstique.

II. $0^{gr},969$ de matière ont donné 0,904 d'acide tungstique.

Ce qui correspond à :

	I.	II.
Tungstène.....	73,26	73,07
Soufre.....	»	»

Il n'entre pas d'oxygène dans ce composé.

Sulfure de tungstène TuS^3.

Berzelius, qui signala le premier ce composé, le prépara en dissolvant de l'acide tungstique dans un sulfhydrate et précipitant ensuite par un acide. Je n'ai rien à ajouter sur cette substance qui, l'analogue de l'acide tungstique, se combine aux sulfures basiques comme l'acide tungstique s'unit aux oxydes basiques et donne une série de corps semblable à celle que fournit cet acide.

Oxydes de tungstène.

Il existe deux oxydes de tungstène présentant la même composition que les deux sulfures de tungstène que nous venons d'étudier :

TuO^2,	TuS^2;
TuO^3.	TuS^3.

Il est un troisième composé oxygéné qui se produit toutes les fois que l'acide tungstique est soumis à une action réductrice ; ce corps, d'un très-beau bleu, est intermédiaire entre les deux oxydes précédents, et doit par conséquent être représenté par la formule

$$TuO^2 + TuO^3.$$

Je n'insisterai que sur ces deux premiers composés. Quant à l'oxyde bleu, comme il présente peu de propriétés qui n'aient pas été examinées et vérifiées plusieurs fois depuis sa découverte, je n'en parlerai qu'accidentellement.

Digitized by Google

Bioxyde de tungstène TuO^2.

Cet oxyde, étudié par Berzelius, est jaune foncé quand on l'obtient par voie sèche, et rougeâtre quand il prend naissance au contact de l'eau.

Pour le préparer sous la première forme, il faut, comme a fait Berzelius, réduire l'acide tungstique dans un courant d'hydrogène sec ; mais deux écueils rendent cette opération difficile : trop chauffée, la matière est en partie réduite à l'état de tungstène métallique ; portée à une chaleur trop faible, elle donne des quantités considérables d'oxyde bleu. Il faut donc trouver les conditions de température convenables, ce qui ne laisse pas de présenter quelque difficulté. Pour réussir à coup sûr, je place l'acide tungstique dans un tube de verre vert que je chauffe tant qu'il se produit de l'eau, en ayant soin que les charbons ne touchent pas le tube et qu'il n'en soit pas recouvert. L'oxyde obtenu dans ces conditions a toujours présenté à l'analyse la composition du bioxyde

$$TuO^2.$$

Si, au moment où on vient de terminer cette préparation, on projette brusquement hors du tube cet oxyde, même après son complet refroidissement apparent, il brûle à l'air avec une vive incandescence et régénère de l'acide tungstique ; mais si on l'a laissé refroidir pendant vingt-quatre heures dans l'hydrogène, il se conserve indéfiniment au contact de l'air, avec la teinte marron qui lui est propre.

Pour préparer l'oxyde par voie humide, on s'y prenait de la façon suivante : on mettait de l'acide tungstique dans de l'eau acidulée, on y ajoutait du zinc, et l'oxyde de tungstène se précipitait en paillettes brillantes, de couleur rouge cuivré.

J'ai commencé par répéter cette expérience et j'ai obtenu en effet une matière rouge ; mais je n'ai pas tardé à constater que l'acide tungstique mis à l'état solide dans cette li-

Digitized by Google

queur s'attaquait seulement à la surface et que la partie interne restait inaltérée, à cause de l'enveloppe protectrice qui l'entourait.

Je me suis servi alors, au lieu d'acide tungstique, d'un tungstate particulier dont l'acide est complétement soluble dans l'eau; comme dans ce cas il n'y a plus de matière solide à réduire, la désoxygénation se poursuit jusqu'à ce que l'oxyde marron soit complétement formé.

La réaction devient très-énergique dans ces conditions et commence au contact du zinc seul. A la première goutte d'acide, de longues traînées bleues sillonnent le liquide suivant la direction verticale des bulles du gaz réducteur, mais il ne se dépose pas traces d'oxyde bleu, car la précipitation n'a lieu que quand la liqueur est devenue brune et que l'oxyde marron s'y trouve formé.

La réduction étant toute terminée, je lave cet oxyde dans un grand ballon avec de l'eau chaude où a passé un courant d'hydrogène, et quand la liqueur cesse d'être acide, je l'évapore au bain d'air dans une cornue traversée par de l'hydrogène sec. Si on ne prend pas toutes ces précautions, la matière passe aussitôt du rouge au gris bleuâtre et se décompose entièrement.

Il est important de la dessécher complétement; sans quoi, les fragments un peu humides se délitent et bleuissent à la longue; l'oxydation gagne les voisins, et une fois l'attaque commencée, elle se poursuit avec une extrême rapidité. On peut, si la dessiccation a été parfaite, conserver cet oxyde dans des flacons remplis d'air; il ne se décompose pas davantage sous l'eau, ou tout au moins il faut cinq ou six mois pour que l'eau se teigne d'une nuance bleue, qui n'augmente d'intensité qu'avec une grande lenteur.

L'acide chlorhydrique et l'acide sulfurique en dissolvent un peu à froid et prennent une belle teinte rouge groseille. A chaud, la dissolution est plus facile et plus complète, et la liqueur devient pourpre. Ce liquide, abandonné à l'air,

Digitized by Google

reste longtemps rouge, mais peu à peu il dépose la matière dissoute qui finit avec le temps par se précipiter tout entière à l'état d'oxyde bleu.

L'acide azotique, le chlore, en quantités infiniment faibles, font passer cet oxyde à l'état d'acide tungstique. Il ne faut que des traces d'acide nitrique dans de l'acide sulfurique pour que cette réaction ait lieu, et assurément si le chlore et tous les oxydants n'agissaient pas de la même manière sur lui, sa dissolution dans l'acide sulfurique, qui a une couleur groseille très-prononcée, serait un réactif de l'acide azotique bien plus sensible que le sulfate de fer. J'ai fait une expérience comparative avec le liquide de M. de Richemont, et celui-ci ne donnait plus d'indication, alors que la teinte rouge de bioxyde de tungstène était encore affectée par l'acide nitrique. Malheureusement cette liqueur est d'une conservation difficile; ce qui empêchera toujours de l'employer pour déceler les oxydants dans une matière quelconque.

La potasse concentrée en dissout de grandes quantités et prend une teinte rouge intense.

Dans ce cas, il y a non-seulement dissolution, mais encore action chimique; car on constate un dégagement abondant d'hydrogène et une formation d'acide tungstique, qui se dissout dans l'excès de potasse employée.

Quand on évapore dans le vide ces solutions alcalines, soit qu'on les ait préparées à froid dans des liqueurs étendues, soit que l'on ait agi à chaud et avec de la potasse concentrée, on n'obtient que de l'oxyde bleu, de l'acide tungstique et du tungstate de potasse, jamais de l'oxyde marron combiné à l'alcali.

Je n'ai pas été plus heureux quand j'ai cherché à évaporer la solution groseille de cet oxyde dans les acides sulfurique ou chlorhydrique; il ne m'est resté que de l'oxyde bleu mêlé d'une quantité très-faible d'acide tungstique.

Digitized by Google

L'ammoniaque ne le dissout pas même à l'ébullition; la liqueur alcaline reste tout à fait incolore.

Ce corps est un désoxydant général; les sels du bioxyde de cuivre sont ramenés au minimum; le bichlorure de mercure en solution, agité avec lui à froid, donne un dépôt blanc de calomel.

Fondu avec du borax, il donne un verre blanc soluble, parce que l'oxyde rouge se change en un acide tungstique qui s'unit à la soude, pour donner du tungstate de soude, sel incolore et soluble dans l'eau.

Rien n'est plus facile que d'analyser ce composé, car il est attaqué par l'eau régale et se change sous son influence en acide tungstique tout à fait privé d'oxyde bleu, et de plus il se réduit à l'état de tungstène métallique, par l'action de l'hydrogène sec. Ces deux procédés réussissent aussi bien avec l'oxyde obtenu par voie sèche, qu'avec celui qui a été préparé au contact de l'eau, à une basse température.

Il est formé de :.

1 équivalent de tungstène Tu...	87	84,46
2 équivalents d'oxygène O^2.....	16	15,54
	103	100,00

En effet,

I. $0^{gr},963$ de cet oxyde préparé par voie sèche ont laissé 0,818 de tungstène.

Ce qui correspond à :

	I.
Tungstène.....	84,94
Oxygène.....	»

Oxyde bleu.

L'oxyde bleu est intermédiaire par sa composition entre l'oxyde marron et l'acide tungstique dont nous allons parler. Il se forme dans une multitude de circonstances. L'a-

Digitized by Google

cide tungstique est-il chauffé dans un creuset, à l'abri du contact de l'air, il devient vert ou bleu. Abandonne-t-on au soleil un flacon contenant de l'acide tungstique et de l'eau ordinaire, l'acide tungstique prend un reflet bleuâtre. Il suffit, en un mot, de mettre l'acide tungstique en présence d'une substance réductrice, pour être certain d'obtenir l'oxyde bleu. Voilà des modes de production par désoxydation.

Voulez-vous avec de l'oxyde rouge faire l'oxyde bleu? Abandonnez-en à l'air un fragment, et bientôt il se délitera comme de la chaux, foisonnera comme elle et deviendra tout à fait bleu; il se produit donc aussi par l'oxydation des composés inférieurs.

Ce composé est fort stable quand il a été préparé par l'action d'un courant d'hydrogène sur l'acide tungstique. On peut le faire bouillir avec de l'acide nitrique ou de l'eau régale, sans qu'il s'attaque, et l'oxygène reste sans effet sur lui, à moins que la température ne soit fort élevée.

Cette stabilité ne tient pas à sa nature propre, mais aux conditions dans lesquelles il a pris naissance; car si l'on prépare cet oxyde par voie humide, et qu'on le mette en contact avec de l'eau régale ou de l'acide azotique, il est tout de suite oxydé.

Je n'insisterai pas sur ses autres propriétés qui sont connues: je voulais seulement montrer qu'il est dans la série du tungstène ce que le sesquioxyde est dans la série du fer, ce que l'oxyde rouge est dans celle du manganèse.

Acide tungstique.

L'acide tungstique TuO^3 est la combinaison la plus importante que produise le tungstène, car elle donne naissance, par son union aux alcalis et aux bases, à un grand nombre de composés; de plus, cet acide est l'intermédiaire nécessaire par lequel il faut passer pour aller du minerai de tungstène

Digitized by Google

à ce métal et aux composés binaires que nous venons d'étudier.

Acide tungstique anhydre.

On prépare ce corps avec facilité en chauffant au rouge les divers hydrates d'acide tungstique. Il est alors à l'état d'une poudre non cristalline, d'un jaune clair si l'opération n'a pas été faite en présence de corps réducteurs. On peut l'obtenir cristallisé sous les formes particulières aux tungstates d'ammoniaque par la calcination de ces sels en cristaux.

Quand on chauffe l'acide tungstique au rouge, il change de teinte, comme l'oxyde de zinc, le sesquioxyde de fer, etc., de jaune il devient orangé; mais par le refroidissement il reprend sa nuance primitive, comme le font ces mêmes oxydes.

Il fond aisément à la température du feu de forge; on peut faire cette expérience dans un creuset en terre, et quand on le casse, on trouve la matière formée de longues plaques cristallisées, rendues un peu verdâtres par l'action réductrice des gaz du foyer.

L'oxygène est sans action sur lui.

L'hydrogène à une température de 250 degrés le réduit en oxyde bleu; au rouge sombre, c'est l'oxyde marron qui prend naissance, et quand la chaleur est aussi forte que possible, la réduction en tungstène métallique est complète.

Le soufre le change en acide sulfotungstique, surtout en présence d'un alcali, et dans ce cas il se forme un sulfotungstate.

Le chlore l'attaque et donne naissance à de l'oxychlorure jaune; le brôme et l'iode ne paraissent pas réagir sur lui.

Le charbon le réduit avec peine, et le métal se carbure dès qu'il se forme.

Cet acide fondu avec un excès de borax donne une matière

Digitized by Google

incolore qui est un mélange de tungstate et de borate alcalin ; mais si l'acide tungstique domine, il y a réduction partielle et production d'une substance opaque, bleue ou verte. On a ainsi une espèce d'émail, qu'on obtient mieux encore en remplaçant le borate par de l'acide borique.

On a dit qu'il était insoluble dans les alcalis : c'est une erreur, l'ammoniaque elle-même attaque l'acide tungstique calciné ; si l'on tient à l'ébullition, pendant quelque temps, de l'acide tungstique anhydre avec une solution aqueuse d'ammoniaque et qu'on évapore le liquide, des aiguilles de tungstate d'ammoniaque s'y déposent bientôt en abondance.

Il décompose vivement les carbonates alcalins. Si la solution est concentrée, et la température voisine de 100 degrés, le liquide peut même être projeté hors du vase ; quand le carbonate est étendu, la décomposition se fait avec lenteur et on ne peut apercevoir de dégagement d'acide carbonique ; mais on constate la présence de l'acide tungstique dans la liqueur.

On voit assez souvent l'acide tungstique anhydre ou hydraté tenu en suspension dans l'eau prendre la teinte bleue de l'oxyde inférieur ; cette désoxydation n'est pas due à l'action de la lumière sur l'acide, mais à la présence au sein de l'eau de poussières organiques qui font l'office de corps réducteurs ; en effet, de l'acide tungstique pur mis au contact d'eau distillée dans un flacon bien propre a conservé sa teinte jaune, même après quinze jours d'exposition au soleil ardent du mois de juillet, et dès qu'on a laissé pénétrer de la poussière dans le vase, la teinte a passé rapidement du jaune au bleu verdâtre.

Hydrates d'acide tungstique.

Il existe deux hydrates d'acide tungstique distincts : l'un, insoluble, très-stable, donne naissance aux tungstates anciennement connus et sature 1 équivalent de base ; l'autre,

Digitized by Google

soluble dans l'eau, fort peu stable, produit des sels tout à fait différents des précédents. Sa capacité de saturation est moindre, car les sels les plus riches en alcalis n'en contiennent que $\frac{1}{2}$ équivalent pour 1 d'acide tungstique, TuO^3.

Hydrate insoluble ou acide tungstique,
TuO^3.

Cet acide se prépare directement au moyen de wolfram par deux procédés : l'un, peu économique, tant par le faible rendement que par le prix des substances réagissantes, fournit un acide parfaitement pur ; le rendement du second est considérable, les substances dont il nécessite l'emploi sont d'un prix peu élevé, mais le produit obtenu est toujours impur.

Le premier moyen repose sur la décomposition du wolfram par l'eau régale.

Je place sur un bain de sable des fioles à fond plat ne renfermant qu'une couche mince de wolfram en poudre, mouillée d'eau régale contenant un grand excès d'acide chlorhydrique ; l'acide nitrique seul ne produit pas d'acide tungstique. Je chauffe faiblement de façon à entretenir un léger dégagement de vapeurs rutilantes, et je rajoute de l'eau régale quand les ballons sont presque secs.

Si l'opération est menée convenablement, la formation d'acide tungstique sera complète quand cette nouvelle dose de liquide sera évaporée. Les ballons sont alors remplis d'eau, et la poudre jaune qui s'est formée est lavée tant que la liqueur s'écoule acide.

On remplace à ce moment l'eau par une solution diluée d'ammoniaque qui dissout l'acide tungstique, et on évapore aux trois quarts après filtration. Le tungstate d'ammoniaque cristallise ; on lui fait subir une deuxième cristallisation, et on précipite à la température de l'ébullition par l'acide azotique ou l'acide chlorhydrique. Si l'on veut obtenir l'acide anhydre, il suffit de calciner le tung-

Digitized by Google

state d'ammoniaque ; 1550grammes de wolfram d'Allemagne ne donnent, par ce procédé, que 180 à 200 grammes d'acide tungstique pur, et il revient à un prix élevé à cause de la dépense en acide nitrique et en ammoniaque.

Le second mode de préparation consiste dans l'emploi d'un mélange de carbonate et d'azotate de soude, que j'ai substitué au carbonate seul, employé d'ordinaire pour attaquer le wolfram. Il en résulte un notable avantage, parce qu'on peut opérer la précipitation de l'acide tungstique non plus par l'acide azotique, mais par l'acide chlorhydrique.

On fait un mélange intime de

Wolfram.....	500
Carbonate de soude sec...	850
Nitrate de soude.....	150

et le tout est chauffé avec du coke dans des creusets en terre lutés ; on agite avec un ringard pour éviter le boursoufflement de la substance qui s'écoulerait hors du vase, et quand la matière est en fusion tranquille, on la verse sur une plaque de tôle ; le creuset remis aussitôt dans le feu peut servir à six ou huit opérations semblables.

La masse solidifiée est réduite en poudre et mise en macération dans de l'eau tiède qui dissout les sels alcalins. On passe sur un linge, et on verse le liquide filtré et chaud dans de l'acide chlorhydrique jusqu'à cessation d'effervescence. L'acide tungstique précipité est lavé par décantation.

Pour enlever l'alumine et l'acide silicique qui ont été mis en liberté avec l'acide tungstique, on traite le mélange humide de ces trois corps par l'ammoniaque qui dissout l'acide tungstique seul, et on le reprécipite de la même façon par un acide après avoir filtré la liqueur.

Ce procédé est défectueux, parce que, malgré le nombre de lavages, l'acide tungstique reste toujours mêlé de soude ; mais pour le plus grand nombre de cas sa pureté est suffisante ; ainsi, on peut s'en servir quand on veut ob-

Digitized by Google

tenir les sels de soude, les tungstates métalliques, les chlorures, les sulfures, etc.; mais on doit le rejeter quand on veut préparer, avec cet acide, des substances pures qu'on destine à l'analyse. C'est son emploi qui est la cause de la plupart des erreurs qui se sont glissées dans les travaux faits antérieurement sur les tungstates.

Par ce procédé, le wolfram d'Allemagne donne au moins le tiers de son poids d'acide tungstique. Quand on agit sur des cristaux purs, le rendement s'élève encore ; en effet, 4 kilogrammes de minerai choisi m'en ont donné, après dix lavages, 1930 grammes, c'est-à-dire près de la moitié de leur poids.

Dans le principe, j'opérais la précipitation à froid, et en versant l'acide chlorhydrique dans le tungstate ; mais je remarquai bientôt que la quantité de matière obtenue était variable à chaque opération, et que quelquefois elle était extrêmement faible. Je changeai alors les conditions de la précipitation, après m'être assuré que l'on n'entraînait pas d'acide tungstique à l'état soluble dans les liqueurs, lorsque la précipitation était faite à chaud, surtout en présence d'un excès de l'acide précipitant.

L'expérience suivante prouve la vérité de cette assertion.

Je pris 500 grammes de wolfram et les fondis avec les doses de matières indiquées plus haut, en tout 1500 grammes.

Après fusion, la substance fut reprise par l'eau et le liquide divisé en deux parties égales : l'une fut traitée à froid par l'acide chlorhydrique ; dans l'autre, la précipitation se fit à la température de l'ébullition. Les acides précipités furent lavés par décantation, chacun d'eux huit fois avec 5 litres d'eau à chaque lavage.

Les résultats furent très-différents. On peut les résumer ainsi.

Quand l'acide est formé à chaud, l'hydrate tungstique est jaune, les eaux de lavage passent claires, et le dépôt se forme en quelques heures au fond des vases.

Digitized by Google

Si l'acide est précipité à froid, l'hydrate n'est plus jaune, mais d'un blanc de lait; les eaux, d'abord limpides, deviennent tout à fait troubles au quatrième ou au cinquième lavage; le dépôt ne s'opère qu'avec lenteur, et même la liqueur ne s'éclaircit jamais complétement. Si on essaye de la filtrer, elle coule trouble, et on remarque que la matière solide qui passe obstinément à travers les mailles du filtre est en petits cristaux nacrés d'une ténuité si grande, qu'ils restent en suspension pendant plusieurs mois au sein du liquide.

Le rendement est beaucoup plus faible dans ces conditions, et tandis que j'obtins dans des liqueurs bouillantes 98 grammes d'acide tungstique, je n'en recueillis, par le traitement à froid, que 52gr,5.

Il vaut mieux verser la dissolution de tungstate dans l'acide chlorhydrique que faire l'inverse, parce que les liqueurs n'ont pas besoin d'être très-chaudes; mais le résultat serait le même si on versait peu à peu l'acide dans le tungstate en dissolution bouillante : seulement dans ce cas la précipitation complète de l'hydrate ne serait pas instantanée comme dans l'autre; il faut une ébullition un peu prolongée pour que l'acide rendu soluble passe en entier à la modification insoluble.

Ainsi, j'ai versé 30 grammes de tungstate d'ammoniaque en solution chaude dans de l'eau contenant 30 grammes d'acide chlorhydrique, et j'ai obtenu aussitôt un dépôt de 23gr,5 d'acide tungstique.

J'ai dissous, d'autre part, dans l'eau bouillante, 30 grammes de tungstate d'ammoniaque et y ai versé peu à peu 30 grammes d'acide chlorhydrique chaud. Le précipité, faible d'abord, a augmenté avec le temps de l'ébullition, et finalement j'ai recueilli, comme dans le cas précédent, 23gr,5 d'acide tungstique.

Il résulte de ce qui précède que si on prépare l'acide tungstique à froid, on perd, dans les lavages, de notables

Digitized by Google

quantités de l'acide d'abord précipité. Pour déterminer jusqu'où pouvait aller cette perte, j'ai pris 500 grammes de wolfram que j'ai fondus avec le carbonate de soude et le nitre, et j'ai précipité avec lenteur la liqueur alcaline très-étendue au moyen de l'acide le plus dilué possible; j'ai prolongé les lavages jusqu'au douzième, et n'ai recueilli que 30 grammes d'acide tungstique.

A quoi tient cette disparition d'acide tungstique? A deux causes; la première, la moins importante, qui a été remarquée depuis fort longtemps, est cette facilité avec laquelle l'acide précipité traverse tous les filtres; Berzelius l'attribue à une combinaison de l'acide tungstique avec l'acide sulfurique ou l'acide chlorhydrique précipitants. Cette interprétation est difficile à admettre, car lorsqu'on lave de l'acide tungstique récemment précipité, les trois ou quatre premières eaux de lavage sont limpides, et le liquide ne devient trouble que lorsque l'acide mis en excès et le sel formé ont presque complétement disparu.

Pour éclaircir ces doutes, je recueillis cette substance solide en faisant bouillir le liquide opalin; mais je ne m'en tins pas là, car je reconnus que la matière qui, tenue en suspension, était cristalline, devenait amorphe par l'ébullition, et se réunissait en petites pelotes jaunâtres; je craignis de l'avoir décomposée par l'action de la chaleur, et je dus attendre que par un dépôt prolongé il s'en précipitât au fond des flacons de lavage une quantité suffisante pour en faire l'analyse. L'essai de cette dernière substance donna les mêmes résultats que celui de la première, et il m'a été impossible de constater dans l'une ou l'autre la présence de l'acide précipitant.

Qu'il y ait ou non des composés formés par l'acide tungstique et l'acide sulfurique ou l'acide chlorhydrique, une chose est certaine, c'est que quand on prépare l'acide tungstique à froid, les dernières eaux de lavage sont toujours troubles; que ce trouble est dû à des cristaux très-ténus sem-

Digitized by Google

blables à ceux du bioxyde de barium obtenus au moyen de l'eau oxygénée, et que ces cristaux qui passent d'ordinaire à travers les filtres y sont retenus par l'agrégation que leur donne une ébullition de quelques instants; quant à moi, je crois que cette matière est de l'acide tungstique très-pur, amené à un état de division tellement grand, que les mailles d'aucun tissu ne peuvent l'intercepter.

Quoi qu'il en soit, cette première cause de perte d'acide tungstique est toujours assez faible, et la principale est la formation d'un hydrate soluble d'acide tungstique qui prend naissance toutes les fois que de l'acide tungstique insoluble peu agrégé est en contact avec un tungstate alcalin dissous. Nous reviendrons bientôt sur cet hydrate.

Les procédés précédents donnent l'acide tungstique hydraté à l'état d'une poudre amorphe; on peut l'obtenir à l'état cristallin, soit en abandonnant à l'air humide des cristaux de chlorure ou d'oxychlorure de tungstène, soit en évaporant à une basse température une dissolution d'acide tungstique dans l'acide fluorhydrique.

Pour cela, on dissout à 50 ou 60 degrés l'acide tungstique hydraté dans une solution concentrée d'acide fluorhydrique et on évapore à l'air cette dissolution; le fluorure de tungstène d'abord formé, se décomposant au contact de l'eau, régénère de l'acide fluorhydrique qui se réduit en vapeurs et de l'acide tungstique jaune qui, se déposant avec lenteur, affecte des formes cristallines parfaitement nettes.

Nous avons vu que lorsqu'on précipite un tungstate par un acide à une basse température, il se dépose un hydrate blanc gélatineux; et que si la précipitation est faite à chaud, l'hydrate est jaune et en poudre assez lourde.

Ces deux corps, différents au point de vue physique, sont-ils distincts chimiquement parlant ou présentent-ils la même composition?

Pour résoudre cette question, j'ai précipité successivement à chaud et à froid un tungstate d'ammoniaque, un

Digitized by Google

tungstate neutre et un bitungstate de potasse; les résultats ont été très-nets et peuvent se résumer ainsi :

1°. Quand on précipite à chaud un tungstate, quel qu'il soit, l'hydrate obtenu est jaune et sa composition se représente par la formule

$$HO, Tu O^3.$$

2°. Si la précipitation s'opère à froid, l'hydrate est blanc et sa formule est

$$2\,HO, Tu O^3.$$

Je vais citer quelques exemples.

I. Acide tungstique fait à chaud, tel qu'il se dépose dans le traitement du wolfram par l'eau régale.

1^{gr},05 ont laissé 0,96 d'acide tungstique anhydre.

Ce qui correspond à :

Eau.....	7,89
Acide tungstique....	92,11
	100,00

II. Acide tungstique hydraté précipité à froid du tungstate d'ammoniaque, séché à la température ordinaire.

1^{gr},340 de ce sel ont laissé 1,13 d'acide tungstique.

Ce qui donne, en centièmes :

Eau.....	14,48
Acide tungstique....	85,52
	100,00

III. Acide hydraté très-pur retiré du chlorure décomposé au contact de l'eau, desséché à la température ordinaire.

0^{gr},564 ont laissé au rouge 0,483 d'acide tungstique.

Ce qui correspond, en centièmes, à :

Eau.....	14,20
Acide tungstique....	85,80
	100,00

Digitized by Google

La première analyse donne :

	I.
Acide tungstique.....	92,19
Eau.....	7,89

Et la théorie indique pour HO, TuO^3 :

1 équivalent HO.....	9	7,50
1 équivalent TuO^3.....	111	92,50
	120	100,00

Les deux dernières analyses fournissent :

	III.	IV.
Eau.....	14,48	14,20
Acide tungstique.....	85,52	85,80

et l'hydrate 2 HO, TuO^3 est formé de

2 équivalents de HO.....	18	13,94
1 équivalent de TuO^3.....	111	86,06
	129	100,00

L'acide tungstique hydraté insoluble existe donc combiné à deux proportions d'eau différentes. Ces deux hydrates traités par les bases donnent naissance aux mêmes sels.

Hydrate soluble ou acide métatungstique, Tu^2O^6.

Cet hydrate ne peut être obtenu à l'état de liberté, parce qu'il est très-instable et régénère l'hydrate insoluble toutes les fois qu'on veut lui enlever l'eau dans laquelle il est dissous. On s'assure de son existence en versant dans une dissolution de certains tungstates un acide énergique ; il ne se forme d'abord aucun précipité, mais si on porte le liquide à l'ébullition, celui-ci se trouble bientôt, et donne un dépôt d'acide tungstique insoluble : si on l'évapore dans le vide, on voit de même l'hydrate insoluble prendre naissance quand les liqueurs deviennent très-concentrées.

Les sels contenant cet hydrate soluble prennent naissance

Digitized by Google

par la réaction de l'hydrate insoluble, 2HO, TuO³ sur un tungstate en dissolution; si on fait bouillir cet acide avec une solution de tungstate de potasse, de soude ou d'ammoniaque, il s'y dissout bientôt, mais la liqueur qui en résulte précipite encore par les acides. On continue l'ébullition jusqu'à ce qu'une petite partie de la liqueur essayée par l'acide chlorhydrique cesse de donner un dépôt; quand la réaction est terminée, on évapore lentement et il cristallise par refroidissement des sels tout à fait différents de ceux qu'on a employés.

Cette production d'un hydrate soluble explique la perte notable qu'on remarquait, sans en connaître la cause, dans la préparation de l'acide tungstique ordinaire. En effet, quand on verse de l'acide chlorhydrique dans le mélange de tungstate et de carbonate alcalin résultant de l'attaque du wolfram, il se forme d'abord de l'hydrate 2HO, TuO³; celui-ci, en contact avec le reste du tungstate non décomposé, s'y dissout et donne naissance à l'hydrate soluble, qui n'ayant pas la propriété de se précipiter sous l'influence des acides, reste dissous dans la liqueur et est entraîné par les lavages.

Le deuxième hydrate insoluble HO, TuO³ ne peut pas, comme le précédent, donner naissance à l'hydrate soluble. Pour le prouver, j'ai pris 1 gramme de tungstate d'ammoniaque que j'ai fait bouillir avec 10 centimètres cubes d'acide azotique concentré. L'acide tungstique précipité a été lavé sur un filtre avec une grande quantité d'eau, qui est toujours restée limpide; le résidu calciné a donné 0gr,86 d'acide tungstique, ce qui est la quantité indiquée par la théorie.

J'ai remplacé l'acide nitrique concentré par de l'acide nitrique faible et d'autres acides concentrés ou étendus; le résultat a été toujours le même : dans aucun cas il n'y a eu perte d'acide tungstique quand on a eu soin d'opérer la précipitation à chaud, c'est-à-dire dans les conditions où HO, TuO³ prend naissance.

Digitized by Google

L'acide métatungstique diffère de l'acide tungstique par ses propriétés chimiques aussi bien que par ses caractères extérieurs; sa capacité de saturation est plus faible, car dans les métatungstates les plus neutres le rapport de l'oxygène de l'acide à celui de la base est de 6 : 1, tandis que ce rapport dans les tungstates neutres est de 3 : 1. Ces deux hydrates présentent l'un vis-à-vis de l'autre les analogies et les différences que M. Fremy a établies pour l'acide stannique et l'acide métastannique, l'acide antimonique et l'acide méta-antimonique, etc.

Tungstates de potasse.

1°. Neutre..... KO, TuO^3;
Hydrates... KO, TuO^3, Aq;
$KO, TuO^3, 5\,Aq$.

Nous avons vu que le tungstène disparaissait avec rapidité dans du carbonate de potasse fondu, que les oxydes inférieurs du tungstène se dissolvaient dans cet alcali, et que la réaction de l'acide tungstique sur le carbonate de potasse pouvait devenir très-vive dans certaines conditions.

C'est par ce dernier moyen qu'on se procure le plus aisément du tungstate de potasse.

On porte à 60 ou 80 degrés une dissolution de 400 grammes de carbonate de potasse marquant 45 degrés, et on y fait tomber peu à peu et en agitant 450 grammes d'acide tungstique en poudre. Il se fait à chaque adjonction de matière un dégagement abondant d'acide carbonique; la liqueur s'échauffe, et, si la température était trop voisine de 100 degrés, il se produirait une véritable ébullition qui pourrait projeter la matière au dehors du vase.

On filtre le liquide bouillant, et l'on trouve après refroidissement une cristallisation abondante de tungstate de potasse en longues aiguilles déliées ou quelquefois en aiguilles pressées les unes contre les autres et formant par leur agglomération de gros cristaux. On décante et laisse

Digitized by Google

égoutter la matière, qu'on sèche ensuite dans des papiers; il est nécessaire de la faire recristalliser, car elle retient avec opiniâtreté du carbonate de potasse dont il est très-difficile de la débarrasser complétement.

Il est important d'agir avec rapidité et d'employer pour ces cristallisations des liqueurs aussi saturées que possible à chaud, qui déposent le sel par refroidissement; car, par l'ébullition, il se décompose en partie et donne un dépôt blanc d'hydrate d'acide tungstique; mais il se forme surtout des combinaisons de tungstate et de carbonate qui restent à l'état d'un liquide sirupeux d'où il est impossible de retirer le tungstate complétement pur.

Les cristaux ainsi obtenus sont transparents; pour les dessécher, on doit les presser dans du papier, car, abandonnés sous une cloche avec de la chaux, ils s'effleurissent.

Quand ils sont bien purs, ils ne tombent pas en déliquescence à l'air; mais il est fort difficile, je le répète, d'enlever tout le carbonate auquel ils doivent cette propriété.

Le tungstate de potasse, desséché dans un courant d'air sec à la température ordinaire, renferme 1 équivalent d'eau de cristallisation, qu'on peut lui enlever par une température plus élevée et par la fusion.

I. $1^{gr},195$ de matière ont fourni 0,786 d'acide tungstique et 0,617 de sulfate de potasse.

II. $0^{gr},878$ de ce même échantillon ont été desséchés dans le vide, puis à 100 degrés jusqu'à cessation de perte dans le poids et ont laissé 0,822 de tungstate de potasse sec.

Ce qui conduit à la formule

$$KO, TuO^3, Aq.$$

En effet, ce sel renferme :

KO.....	47	28,15
TuO^3.....	111	66,46
Aq.....	9	5,39
	167	100,00

Digitized by Google

Et les nombres cités plus haut correspondent à

	I.	II.
Acide tungstique.....	65,79	»
Potasse.....	27,88	»
Eau.....	»	6,32

Quant au procédé d'analyse, il est fort simple, mais il exige des soins particuliers.

Le sel pesé est chauffé au creuset de platine avec de l'acide sulfurique; on évapore à sec et on calcine. On recommence un deuxième traitement semblable, mais l'on chauffe cette fois-ci au rouge pendant quelques minutes, afin de décomposer le bisulfate de potasse et d'agréger assez l'acide tungstique pour qu'il ne passe plus à travers les filtres.

Quand le creuset est froid, on y met de l'eau qu'on tiédit de façon à dissoudre le sel, et l'on filtre; l'acide tungstique laissé sur le papier est lavé et pesé après calcination.

Le liquide qui contient le sulfate est évaporé, et le résidu calciné et pesé est le sulfate de potasse, du poids duquel on déduit la quantité de potasse.

Il est nécessaire de chauffer fortement, sans quoi les analyses sont doublement fautives; l'acide tungstique est dosé trop bas, car il en passe à travers le filtre; la potasse est dosée trop haut, car il reste du bisulfate de potasse.

Si la calcination a été suffisante, il est inutile, comme l'a recommandé M. Margueritte, de laver le filtre avec de l'eau chargée de sel ammoniac; je n'ai pas remarqué non plus, comme ce chimiste, que l'acide tungstique décomposât les sulfates (à la température du rouge très-sombre à laquelle on doit opérer cette calcination), et j'ai fait, en pesant le sulfate de potasse, un dosage de potasse direct. Nous verrons bientôt que les erreurs de ceux qui ont étudié les tungstates tiennent surtout à des déterminations par différence; car ces sels renfermant souvent de l'eau de combinaison, on augmente le poids du corps non dosé de toute la quan-

Digitized by Google

tité d'eau de combinaison qui entre dans le produit analysé et qui ne s'est pas volatilisée à 120 degrés.

Les auteurs donnent au tungstate de potasse la formule

$$KO\,Tu\,O^3,\,5\,Aq.$$

Il existe, en effet, un tungstate de potasse qui contient une plus grande quantité d'eau que le précédent; mais il m'a été impossible de l'analyser, car il renferme toujours du carbonate de potasse qui le rend déliquescent, et même je ne serais pas étonné que ce prétendu tungstate à 5 équivalents d'eau ne fût le premier incomplétement purifié dans lequel on n'aurait déterminé que l'acide tungstique, et dont on aurait établi la formule sur cette seule donnée.

Le tungstate de potasse produit sur la langue une première impression de fraîcheur; mais on éprouve bientôt après à l'arrière-bouche une sensation désagréable où domine une amertume prononcée.

Il est très-soluble dans l'eau; mais à chaud la solubilité est beaucoup plus considérable qu'à froid; ainsi, dans une expérience que j'ai faite, un litre d'eau bouillante en a dissous 1522 grammes, et à froid il s'en est déposé à peu près les deux tiers; je n'ai retrouvé que 520 grammes de sel dans la liqueur.

Ces nombres, au reste, ne sont qu'approximatifs, car il est difficile de se procurer beaucoup de ce sel à l'état de pureté, et je ne puis certifier que celui qui m'a servi pour cette détermination fût chimiquement pur.

Si l'on verse de l'alcool sur la solution aqueuse et concentrée de ce sel, il ne s'y mêle pas, et forme une couche liquide à la partie supérieure, même après une longue et vive agitation : les deux liqueurs, d'abord parfaitement limpides, se troublent bientôt à la surface de séparation, et il s'y produit à la longue des aiguilles de tungstate de potasse, qu'on peut obtenir très-pur par ce procédé. Le liquide alcoolique ne renferme que des traces de sel.

Digitized by Google

Si l'on fait passer un courant de chlore sur du tungstate de potasse privé de son eau par une dessiccation prolongée, on obtient de l'oxychlorure jaune, et du chlorure de potassium prend naissance.

Du soufre chauffé avec ce sel s'empare du métal, en se substituant à l'oxygène, et produit du sulfotungstate de potasse, dont nous avons déjà parlé à l'occasion de l'acide sulfotungstique TuS^3. Ce sulfosel se forme aussi par l'action de l'hydrogène sulfuré sur le tungstate de potasse.

Il produit un froid notable en se dissolvant dans l'eau.

Les acides minéraux ordinaires, l'acide oxalique, l'acide acétique, l'acide sulfureux, l'acide borique, en précipitent l'acide tungstique.

Quand on dirige un courant d'acide carbonique dans une solution saturée de ce tungstate, la liqueur se prend en une masse consistante de petits cristaux nacrés et brillants, sur lesquels nous allons revenir. Si la solution est assez étendue pour ne marquer que 4 degrés à l'aréomètre, ces cristaux se forment encore, mais au bout d'un temps assez long.

Si on mêle une dissolution de ce sel avec celle d'un bicarbonate, il n'y a aucun précipité ni à froid ni à chaud. L'acide silicique se précipite dans ces mêmes circonstances.

L'acide silicique présentant beaucoup de réactions semblables à celle de l'acide tungstique, nous insisterons à la fin de ce travail sur les différences et les similitudes que présentent ces acides, et nous remettons à ce moment l'étude des phénomènes qui se passent quand on précipite l'acide tungstique du tungstate de potasse par une liqueur acide plus au moins étendue.

2°. *Bitungstate de potasse*, $KO, 2\,TuO^3$.

On connaît depuis longtemps l'existence de ce composé, qui s'obtient en fondant au rouge dans un creuset de terre parties équivalentes d'acide tungstique et de tungstate

Digitized by Google

neutre de potasse ; la matière, coulée sur une plaque de marbre, est incolore et présente l'aspect du nitre fondu quand elle est pure et renferme deux équivalents d'acide. C'est au moyen de ce corps que j'ai pu obtenir à l'état de pureté le bisulfure de tungstène.

Ce sel peut être préparé par voie humide en versant de l'acide tungstique dans une dissolution chauffée de tungstate de potasse neutre ; il se dissout instantanément, et si la liqueur est suffisamment concentrée, il se dépose, par refroidissement, des cristaux lamelleux, groupés les uns contre les autres, qui constituent le bitungstate à l'état de pureté.

3°. *Tungstate de potasse insoluble*,

KO, 2 Tu O^3, 3 HO.

Ce sel, qui n'avait jamais été obtenu, est remarquable par son mode de préparation, sa forme cristalline et sa composition.

Si on fait passer un courant d'acide carbonique dans le tungstate de potasse, du bicarbonate de potasse prend naissance et il se fait en même temps un tungstate de potasse insoluble, mais non de l'acide tungstique insoluble ; la base s'est partagé les deux acides.

Quand le dépôt n'augmente plus, on le jette sur un filtre et on lave tant que l'eau s'écoule alcaline. Les cristaux sont alors séchés ; leur aspect nacré est très-remarquable et leur éclat très-prononcé.

Ils sont très-peu solubles dans l'eau ; en effet, 100 centimètres cubes d'eau bouillante en dissolvent $6^{gr},60$, et 100 centimètres cubes d'eau froide, $2^{gr},15$. Ils renferment de l'eau qui ne part pas à 120 degrés, mais exige une température supérieure à 200 degrés pour disparaître complétement.

Soumis à l'analyse, ils m'ont présenté les résultats

:

20 de matière ont fourni 0,618 acide tungstique et
fate de potasse.

Digitized by Google

II. $0^{gr},636$ de matière ont donné 0,476 d'acide tungstique et 0,190 de sulfate de potasse.

III. $0^{gr},628$ de cette même substance ne perdent à 120 degrés que 0,003.

Ces nombres conduisent à la formule

$$KO, 2\,Tu\,O^3, 3\,HO.$$

En effet, ce sel renferme :

KO.....	47	75,00
$2\,Tu\,O^3$.....	222	15,87
3 HO.....	27	9,13
	296	100,00

Et nous avons obtenu :

	I.	II.	III.
Potasse.....	16,00	16,03	»
Acide tungstique.....	75,36	74,84	»

Il peut être considéré comme un sel bibasique dans lequel deux molécules d'eau prendraient la place de deux molécules de base.

Tungstates de soude.

Il existe un tungstate de soude neutre, un bitungstate de soude et un tungstate correspondant au tungstate de potasse préparé par l'action de l'acide carbonique sur le sel neutre.

Tungstate neutre $Na\,O, Tu\,O^3 + 2\,Aq.$

Ce sel, très-stable au contact de l'air et parfaitement cristallisé, s'obtient avec facilité en dissolvant l'acide tungstique dans la soude caustique ou le carbonate de soude.

On projette peu à peu dans l'alcali l'acide tungstique réduit en poudre fine, en ayant soin de tenir la liqueur à une température voisine de son point d'ébullition, et d'employer une solution de soude concentrée. On filtre bouillant et la liqueur dépose par refroidissement des lames rhomboédriques qui constituent ce sel à l'état de pureté.

On peut du reste lui faire subir une ou plusieurs cristal-

Digitized by Google

lisations, car il n'est pas décomposable au contact de l'eau bouillante.

I. 1gr,049 de ce sel calcinés avec de l'acide sulfurique ont fourni 0,721 d'acide tungstique.

II. 1gr,280 d'un autre échantillon ont donné 0,879 d'acide tungstique.

III. 0gr,867 d'une troisième matière ont donné 0,595 d'acide tungstique et 0,395 de sulfate de soude.

IV. 0gr,560 de ce dernier échantillon ont abandonné dans le vide et à 100 degrés 0,059 d'eau.

Ces analyses conduisent à la formule

$$Na\,O,\ Tu\,O^3 + 2\,Aq.$$

Car ce sel renferme :

Na O.	31	19,37
Tu O^3.	111	69,36
2 Aq.....	18	11,27
	160	100,00

Et les analyses donnent en centièmes :

	I.	II.	III.	IV.
Soude.....	»	»	19,83	»
Acide tungstique.....	68,77	68,78	68,92	»
Eau.....	»	»	»	10,53

Il est plus soluble à chaud qu'à froid ; j'en ai pris deux fois la solubilité sur deux échantillons divers.

La première fois,

10 centimèt. cubes d'eau ont dissous à 100°. 12gr,414 de sel.
Et 10 centim. cubes d'eau ont dissous à 0°. . 4gr,092

La deuxième fois,

10 centimèt. cubes d'eau ont dissous à 100°.. 12gr,302 de sel.
Et 10 centim. cubes d'eau ont dissous à 15°... 5gr,552

Ce sel est insoluble dans l'alcool, comme le tungstate de potasse. Il est décomposé comme lui par les acides oxalique, acétique, borique et sulfureux.

Le chlore, au rouge, l'attaque pour donner naissance à de l'oxychlorure jaune.

Digitized by Google

Le soufre réagit sur lui pour se substituer à l'oxygène et du sulfotungstate de soude se forme.

Il se combine à 1 équivalent d'acide tungstique pour donner un bitungstate $NaO, 2TuO^3$.

L'acide carbonique précipite ses solutions, et produit un tungstate insoluble.

En un mot, les réactions de ce sel sont les mêmes que celles du tungstate de potasse correspondant.

Tungstates d'ammoniaque.

L'étude des tungstates d'ammoniaque est très-importante, car on les prépare facilement à l'état de pureté et ils peuvent être analysés avec une grande exactitude. Nous insisterons sur leur composition et leurs propriétés, car elles seules peuvent jeter quelque jour sur la constitution des divers hydrates d'acide tungstique.

Il en existe trois; ils contiennent la même quantité d'acide tungstique et d'ammoniaque, et ne diffèrent que par la proportion d'eau de cristallisation.

1°. Tungstate crist. à froid. $AzH^4O, 4TuO^3, 3HO + 3Aq$;
2°. » vers 40°. $AzH^4O, 4TuO^3, 3HO + 2Aq$;
3°. » à 100°. $AzH^4O, 4TuO^3 + 3HO + Aq$.

1°. *Tungstate d'ammoniaque obtenu dans l'eau tiède.*

$AzH^4O, 4TuO^3, 3HO + 2Aq$.

L'acide tungstique brut bien lavé est saturé par de l'ammoniaque qui précipite les oxydes de fer et de manganèse; on sépare ces métaux au moyen du filtre et on fait cristalliser le sel par l'évaporation de l'eau à une douce température. Quand l'excès d'ammoniaque a disparu, la cristallisation a lieu aussitôt en grande abondance, car ce sel est beaucoup moins soluble dans l'eau que dans l'ammoniaque. On sépare, égoutte et sèche ces cristaux, qui sont des aiguilles soyeuses et très-fines quand le dépôt se fait dans les conditions que je viens de citer, mais qui se présentent en ai-

Digitized by Google

guilles dures, plus épaisses et moins brillantes quand la cristallisation s'est faite à une température de 50 ou 60 degrés.

Ce sel est purifié par deux nouvelles cristallisations, et on obtient alors des aiguilles prismatiques, brillantes, douces au toucher, s'écrasant facilement sous la pression du doigt, parfaitement stables et nullement décomposables au contact de l'air.

500 grammes d'eau bouillante ont dissous 52 grammes de tungstate d'ammoniaque; par refroidissement, il s'en est précipité 37 grammes. Par conséquent, 100 grammes d'eau dissolvent $10^{gr},4$ de ce sel à 100 degrés, et 3 grammes à la température ordinaire.

Ce sel, se préparant tout simplement par l'action de l'ammoniaque sur l'acide tungstique, est connu depuis fort longtemps, et c'est à lui qu'on attribuait la formule

$$Az\,H^4\,O,\,3\,Tu\,O^3 + 2\,Aq.$$

J'ai dit plus haut les raisons pour lesquelles les anciennes analyses devaient être fautives; voici le procédé auquel je me suis arrêté.

Le sel pesé était mis dans des tubes qu'on plaçait sous la machine pneumatique avec des matières desséchantes, et j'entretenais le vide pendant quinze jours. Pour m'assurer si la dessiccation avait été complète, je portais les tubes dans une étuve à eau après les avoir pesés, et je prenais de nouveau leur poids après les avoir tenus huit heures à 100 degrés. Le poids n'avait pas diminué dans l'intervalle compris entre ces deux pesées, l'une faite dans le vide, et l'autre à 100 degrés; je dirai plus, j'ai remarqué assez souvent qu'il y avait dans ce dernier traitement fixation d'une faible quantité d'eau (1).

(1) Si j'insiste sur le dosage de l'eau dans ces sels, c'est que dans des recherches antérieures on a opéré leur dessiccation à une température supérieure à 200 degrés, et que je me suis servi de ce procédé dans le principe;

Digitized by Google

Je citerai pour exemple trois de mes analyses :

I. $0^{gr},497$ de tungstate d'ammoniaque, chauffés à 160 degrés, ont laissé un résidu de 0,480, tandis que le même poids de ce sel, tenu quinze jours dans le vide et huit heures à 100 degrés, a fourni un résidu d'acide tungstique égal à 0,484.

II. $0^{gr},493$ d'un autre tungstate ont laissé, après un séjour de quinze jours sous la machine pneumatique, un résidu de 0,470. Cette matière, portée ensuite à 100 degrés, a gagné 3 milligrammes et pesait, au sortir de l'étuve, 0,473.

III. $1^{gr},071$ de tungstate d'ammoniaque, séchés de la même façon dans le vide, ne pesaient plus que 0,973; reportés dans l'étuve, ils fixèrent un peu d'eau, car leur poids, après un séjour de huit heures à 100 degrés, était devenu 0,978.

Pour déterminer la proportion d'acide tungstique, je calcinais un poids connu du sel avec quelques gouttes d'acide nitrique, et je le chauffais au rouge pendant un quart d'heure; après refroidissement, je répétais ce traitement et pesais le résidu. Dans le commencement, je me bornais à calciner le sel; mais je ne tardai pas à remarquer qu'à moins de prolonger très-longtemps la calcination, il restait toujours un peu d'ammoniaque combinée à l'acide tungstique et, par suite, que le dosage était imparfait: je joignis alors à la calcination le traitement par l'acide nitrique.

L'ammoniaque a été déterminée de deux façons, par le procédé de M. Dumas et par celui de M. Schlœsing; les résultats ont toujours été les mêmes.

Chaque sel a été analysé un très-grand nombre de fois; je possède notamment vingt-deux analyses de celui qui nous occupe; comme il est le point de départ de tous les

---

mais ne trouvant jamais les mêmes nombres, je recherchai la cause de ces différences et m'assurai que l'eau, en se dégageant à une température élevée, entraînait de l'ammoniaque. Je recueillis cet alcali et vis qu'à 200 degrés, 160 degrés, 140 degrés, il s'en produisait une proportion assez considérable, mais que dans le vide, à la température ordinaire, la décomposition du sel était tout à fait nulle.

Digitized by Google

autres, je tenais dans ce cas, plus encore que dans tout autre, à me mettre à l'abri de toute chance d'erreur.

Je donne à ce sel la formule

$$Az\,H^4\,O,\,4\,Tu\,O^3,\,3\,HO + 2\,Aq.$$

Je ne citerai, pour abréger, que quelques analyses.

I. $0^{gr},654$ de ce sel ont fourni, après calcination, 0,561 d'acide tungstique.

II. $1^{gr},000$ d'un deuxième échantillon ont laissé 0,862 d'acide tungstique.

III. $1^{gr},000$ de ce sel, provenant d'une autre préparation, ont donné 0,864 d'acide tungstique.

IV. $0^{gr},855$ d'un autre produit ont fourni, après calcination, 0,733 d'acide tungstique.

Ce qui correspond, en centièmes, à :

	I.	II.	I.	IV.
Acide tungstique.....	86,40	85,77	86,23	85,73

I. $0^{gr},492$ du premier sel ont perdu dans le vide et à 100 degrés 0,020 d'eau de cristallisation.

II. $0^{gr},498$ du second ont abandonné 0,018.

III. $0^{gr},686$ du troisième produit ont perdu 0,023.

IV. $1^{gr},254$ du quatrième ont perdu 0,037.

Ce qui donne, en centièmes :

	I.	II.	III.	IV.
Eau de cristallisation..	3,213	3,413	3,350	2,950

J'ai dosé l'azote dans ces quatre échantillons et ai obtenu les résultats suivants :

I.	Matière employée.....	$0^{gr},972$
	Température.....	11°
	Pression barométrique.....	$0^{o},753$
	Volume après l'analyse.....	36^{cc}
	Volume après l'absorption par Fe O, SO^3...	$34^{cc},92$

Digitized by Google

II. $0^{gr},964$ ont donné au moyen des liqueurs titrées :

Divisions neutralisant avant.....	25,15
Divisions neutralisant après.....	23,40
	1,75

III. Matière employée..... $0^{gr},957$
Température..... $9°$
Pression barométrique..... $0^{m},763$
Volume du gaz après l'analyse..... 36^{cc}
Volume après l'absorption par Fe O, SO^3.... $35^{cc},30$

Ce qui correspond, en centièmes, à :

	I.	II.	III.
Azote.....	3,34	3,23	3,33

Nous avons donc en résumé :

	I.	II.	III.	IV.
Acide tungstique..	86,40	85,77	86,23	85,73
Eau de cristallisat.	3,21	3,41	3,35	2,95
Azote.....	3,34	3,23	3,33	»

Et la formule

$$Az\,H^4O, 4\,Tu\,O^3, 3\,HO + 2\,Aq$$

fournit :

$4\,Tu\,O^3$.....	444	86,21
Az.....	14	2,71
H^4O.....	12	2,33
$3\,HO$.....	27	5,25
$2\,Aq$.....	18	3,49
	515	100,00

Ces analyses montrent que ce sel renferme de l'eau de constitution, et qu'on devait, par conséquent, commettre une grave erreur lorsque, après avoir dosé l'acide tungstique et l'ammoniaque, on attribuait la différence à l'eau de cristallisation, ou à l'ammoniaque, si on agissait sur le sel séché à 100 degrés, sans déterminer la quantité de cet alcali (1).

(1) Outre la formule $Az\,H^4O, 3\,Tu\,O^3 + 2\,Aq$ attribuée anciennement à ce

Digitized by Google

2°. *Tungstate d'ammoniaque obtenu à la température ordinaire,*

$$Az\,H^4\,O, 4\,Tu\,O^3, 3\,HO + 3\,Aq.$$

J'ai dit en commençant l'étude du sel précédent qu'il avait été obtenu par évaporation à une température élevée; si au contraire la cristallisation se fait à froid, dans le vide par exemple, le sel qui se dépose n'est plus en aiguilles, mais en petites plaques minces, très-brillantes, douces au toucher; il présente la même composition que le précédent et n'en diffère que par 1 équivalent d'eau de cristallisation qu'il possède en plus.

En effet, il fournit à l'analyse les nombres suivants.

I. $0^{gr},402$ ont donné après calcination 0,340 d'acide tungstique.

II. $1^{gr},000$ ont donné après calcination 0,847 d'acide tungstique.

III. $1^{gr},000$ ont donné après calcination 0,848 d'acide tungstique.

IV. $0^{gr},493$ ont perdu dans le vide et à 100 degrés 0,023.

V. $0^{gr},479$ ont perdu dans le vide et à 100 degrés 0,020.

VI. $0^{gr},964$ ont produit 0,030 de gaz azote.

Ce qui correspond, en centièmes, à :

	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
Acide tungstiq..	84,57	84,70	84,80	»	»	»
Eau de cristallis.	»	»	»	4,66	4,77	»
Azote.....	»	»	»	»	»	3,11

Or la formule

$$Az\,H^4\,O, 4\,Tu\,O^3, 3\,HO + 3\,Aq$$

---

sel, il en a reçu plusieurs. Laurent le représentait par le symbole

$$Az\,H^4\,O^{\frac{1,0}{3}}\,HO^{\frac{3}{2}}, 4\,Tu\,O^4 + 3\,Aq.$$

Digitized by Google

donne :

4 Tu O^3	444	84,73
Az	14	2,60
H^4O	12	2,37
3 HO	27	5,15
3 Aq	27	5,15
	524	100,00

3°. *Tungstate d'ammoniaque obtenu à* 100 *degrés,*

$$Az\,H^4O,\ 4\,Tu\,O^3,\ 3\,HO + Aq.$$

Il existe enfin un troisième tungstate d'ammoniaque dans lequel subsiste encore le même groupement, et qui doit être placé à côté des deux précédents, car il n'en diffère que par de l'eau de cristallisation.

Au lieu d'en renfermer 3 équivalents comme le dernier étudié, 2 équivalents comme le premier, il n'en contient plus que 1 seul, ce qu'il doit à sa formation à une température voisine de 100 degrés.

Ce sel, dont la formule est

$$Az\,H^4O,\ 4\,Tu\,O^3,\ 3\,HO + Aq,$$

prend naissance dans la décomposition du métatungstate d'ammoniaque au contact de l'eau bouillante. Nous y reviendrons bientôt.

Tungstates insolubles.

La plupart des tungstates formés par les oxydes métalliques sont insolubles, aussi les obtient-on aisément par une double décomposition entre un tungstate alcalin et un sel métallique dissous dans l'eau. Dans ce cas, la réaction n'est pas aussi simple que celle que nous venons d'indiquer. Malgré la neutralité du sel métallique (azotate d'argent, de baryte) le tungstate insoluble entraîne en se précipitant une assez forte proportion d'acide tungstique; ce qui le prouve, c'est que si on recueille le précipité, qu'on le traite par un acide, il ne s'en dissout qu'une certaine partie. Tout ce

Digitized by Google

qui reste insoluble est de l'acide tungstique parfaitement débarrassé du tungstate qui est soluble dans les acides.

Métatungstates.

Ces sels cristallisent en général assez bien, mais ils sont peu stables à l'état de dissolution; leur altération lente au contact de l'eau froide, plus rapide dans des liqueurs bouillantes ou contenant un acide énergique, est instantanée si le liquide est rendu alcalin par la potasse, la soude ou même l'ammoniaque; dans tous les cas, il y a une certaine quantité d'acide tungstique mise en liberté, et il se forme en même temps un tungstate ordinaire. L'acide tungstique précipité dans ces conditions ne se dissout dans les alcalis qu'avec la plus grande peine.

On les prépare toujours par la réaction de l'acide tungstique hydraté sur les tungstates.

M. Margueritte est le premier qui se soit aperçu que l'acide tungstique pouvait se dissoudre dans les tungstates alcalins en donnant naissance à des sels dans lesquels un acide n'opère pas la précipitation d'acide tungstique. Il en prépara plusieurs (1) qu'il considéra comme des tungstates ordinaires; mais il pressentit l'existence de divers hydrates d'acide tungstique, par cette raison qu'on était obligé d'admettre des fractions d'équivalents d'eau dans les formules de ces sels si on les considérait comme des tungstates simples.

Ces sels se distinguent des tungstates par l'ensemble de leurs propriétés; l'action des acides, des alcalis, des dissolutions métalliques sur les uns et les autres est différente;

(1) Ce sont :

Le bitungstate de soude.....	Na O 4 HO, 2 (Tu O^3);
Le tritungstate d'ammoniaque...	Az H^4 O, 3 (Tu O^3) 5 HO;
Le pentatungstate de potasse.....	KO, 5 (Tu O^3), 8 HO);
Le quadritungstate de soude.....	Na O, 4 Tu O^3, 3 HO;
L'hexatungstate d'ammoniaque...	Az H^4 O, 6 (Tu O^3), 6 HO.

Digitized by Google

la teinture de tournesol est colorée par les premiers en rouge vineux, tandis qu'avec les seconds elle garde toujours une teinte bleue manifeste; enfin dans les tungstates neutres le rapport de l'oxygène de l'acide à celui de la base est de 3 : 1; tandis que dans les métatungstates, qui présentent la plus faible acidité, il est de 6 : 1. Ceci fait que nous leur donnons pour formule

$$KO, Tu^2O^6$$

et que nous représentons l'acide métatungstique par le symbole

$$HO, Tu^2O^6.$$

On connaît des métatungstates acides dans lesquels l'acide peut même être en grand excès; mais il n'y en a pas de basiques, car, mis en présence des alcalis, ils sont décomposés et donnent naissance, pour chaque équivalent de métatungstate neutre employé, à 2 équivalents de tungstate.

L'équation suivante rend compte de cette transformation :

$$KO, Tu^2O^6 + KO, HO = 2(KO, TuO^3) + HO.$$

Métatungstate de potasse neutre,

$$KO, Tu^2O^6.$$

J'ai obtenu ce sel en faisant bouillir du tungstate neutre de potasse avec une quantité d'acide tungstique égale à celle qu'il renferme.

L'ébullition doit être continuée jusqu'à ce qu'un peu de liqueur essayée cesse de se troubler par les acides; le liquide évaporé dépose, par refroidissement, de petits cristaux prismatiques transparents, très-définis dans leur forme et inaltérables au contact de l'air. Ils sont très-solubles dans l'eau froide, et se dissolvent dans l'eau bouillante en toutes proportions; une ébullition prolongée les décompose en partie, et de l'acide tungstique est précipité.

Les acides à froid ne donnent lieu à aucun dépôt quand

Digitized by Google

on les verse dans une dissolution de ce sel, mais après une ébullition de quelques instants, il se forme un trouble dû à de l'acide tungstique qui se précipite; cet acide ne se dissout plus dans les alcalis qu'avec la plus grande difficulté.

Sa décomposition a lieu à la température ordinaire au contact des alcalis caustiques et carbonatés ; cette réaction est instantanée.

Métatungstate de soude neutre,

$$Na\,O, Tu^2\,O^6.$$

Ce sel a été préparé et étudié par M. Margueritte sous le nom de bitungstate de soude; mais on ne peut lui conserver ce nom, parce qu'il se confondrait avec le bitungstate de soude ordinaire qui précipite par les acides et renferme non pas de l'acide métatungstique, mais de l'acide tungstique,

Métatungstate d'ammoniaque neutre,

$$Az\,H^4\,O, 2\,Tu^2\,O^6, HO + 3\,Aq.$$

Quand on fait bouillir avec de l'acide tungstique récemment précipité une dissolution de tungstate d'ammoniaque, en ayant soin de remplacer l'eau qui s'évapore, on constate bientôt que le sel d'ammoniaque, peu soluble d'abord, reste en dissolution dans une quantité d'eau beaucoup moindre et même qu'on peut chasser la majeure partie du liquide sans qu'aucun sel cristallise; si on filtre pour séparer l'excès d'acide tungstique employé et qu'on évapore à consistance sirupeuse, le liquide, réduit aux $\frac{4}{5}$ de son volume primitif, abandonne des cristaux prismatiques d'un très-bel aspect.

Ce sel est fort soluble dans l'eau, il laisse sur la langue une première impression de fraîcheur, que remplace bientôt une sensation très-prononcée d'amertume à l'arrière-bouche; quand on verse dans sa dissolution étendue de l'acide nitrique assez étendu lui-même pour qu'il n'y ait pas échauffement du liquide, il ne se forme aucun

Digitized by Google

précipité d'acide tungstique, tandis que des liqueurs cent fois plus diluées de tungstate d'ammoniaque ordinaire laissent déposer dans les mêmes conditions beaucoup d'acide tungstique. Ce sel n'avait pas encore été obtenu.

Je lui attribue la formule

$$Az\,H^4\,O,\ 2\,Tu^2\,O^6,\ HO + 3\,Aq,$$

d'après les résultats suivants :

I. $0^{gr},996$ ont fourni $0^{gr},874$ d'acide tungstique.

II. $0^{gr},855$ ont fourni $0^{gr},748$ d'acide tungstique.

III. $0^{gr},597$ ont perdu dans le vide et à 100 degrés $0,030$.

IV. $0^{gr},788$ ont perdu dans le vide et à 100 degrés $0,040$.

V. Dosage de l'azote :

Matière employée	$0^{gr},997$
Pression	$0^{m},751$
Température	23°
Volume du gaz	27^{cc}
Volume du gaz après l'action du sulfate de fer	27^{cc}

VI.

Matière employée	$0^{gr},874$
Pression	$0^{m},7502$
Température	22°
Volume du gaz	24^{cc}
Volume du gaz après l'action du sulfate de fer	24^{cc}

On en déduit, en centièmes :

	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
Acide tungstiq..	87,75	87,48	»	»	»	»
Eau de cristallis.	»	»	5,02	5,15	»	»
Azote	»	»	»	»	3,08	3,15

Et la formule

$$Az\,H^4\,O,\ 4\,Tu^2\,O^6,\ HO + 3\,Aq$$

Digitized by Google

donne :

$2\,Tu^2\,O^6$.....	444	87,74
Az.....	14	2,76
$H^4\,O$.....	12	2,37
HO.....	9	1,97
3 Aq.....	27	5,33
	506	100,00

Ce sel est isomérique avec le tungstate d'ammoniaque,

$$Az\,H^4\,O,\ 4\,Tu\,O^3,\ 3\,HO + Aq.$$

Aussi peut-on passer de l'un à l'autre sans addition d'alcali ou d'acide tungstique par la simple action de la chaleur.

Métatungstate d'ammoniaque acide,

$$Az\,H^4\,O,\ 3\,Tu^2\,O^6,\ 3\,HO + 10\,Aq.$$

Lorsqu'on évapore les eaux mères où a cristallisé le sel précédent, ou quand on fait bouillir pendant plusieurs jours une solution du tungstate d'ammoniaque ordinaire, il se dépose de l'acide tungstique insoluble, et la liqueur abandonne, par refroidissement, des octaèdres réguliers d'une transparence parfaite et d'une régularité comparable à celle de l'alun.

Ce sel avait été préparé d'abord par M. Margueritte, qui dit simplement :

« Tritungstate d'ammoniaque (cristaux octaédriques) fond dans son eau de cristal et sous l'eau comme le phosphore :

$$Az\,H^4\,O,\ 3\,Tu\,O^3 + 5\,HO. \text{ »}$$

Laurent fit d'un sel octaédrique d'ammoniaque le point de départ de la série métatungstique et lui donna la formule

$$Tu^3\,O^{10}\,Am^{\frac{5}{3}}\,H^{\frac{2}{3}} + 5\,Aq,$$

et il ajoute après avoir donné cette composition :

« M. Margueritte a également obtenu un sel cristallisé en

Digitized by Google

octaèdres, mais la composition de mon sel ne s'accorde pas avec la formule de M. Margueritte. »

Malgré cette opinion de Laurent, je suis persuadé que ces deux chimistes ont opéré sur le même corps : tous deux le préparent d'une façon identique, car si Laurent enlève une partie de la base au tungstate d'ammoniaque par le moyen de quelques gouttes d'acide nitrique, M. Margueritte s'empare beaucoup mieux de cet excès d'alcali par une ébullition du sel avec de l'acide tungstique.

Quant aux différences entre leurs formules, elles existent il est vrai, mais les nombres qu'elles donnent sont fort rapprochés.

La formule de ce sel ne peut pas être celle de l'un ou de l'autre de ces deux chimistes; M. Margueritte avait cependant dosé exactement l'acide tungstique et l'eau, et s'il a commis une erreur dans l'établissement de la formule, cela tient au procédé dont il s'est servi, à ce qu'il a dosé l'ammoniaque par différence et que la quantité de cet alcali s'est accrue de celle de l'eau de constitution qui existe dans ce sel. Le poids d'acide tungstique qu'il indique (82,42 pour 100) est excellent et le nombre 11,13 qu'il attribue à l'eau ne laisse rien à désirer.

En effet,

I. $0^{gr},917$ de ce sel ont fourni 0,757 d'acide tungstique.

II. $0^{gr},595$ de ce sel ont fourni 0,490 d'acide tungstique.

III. $0^{gr},473$ de ce sel ont fourni 0,393 d'acide tungstique.

IV. $0^{gr},491$ de ce sel ont perdu dans le vide et à 100 degrés 0,054 d'eau.

V. $0^{gr},733$ de ce sel ont perdu dans le vide et à 100 degrés 0,080 d'eau.

VI. $0^{gr},865$ traités par le procédé de M. Schlœsing pour en déterminer l'azote ont fourni :

Divisions neutralisantavant t.....	12,50
Divisions neutralisant après.....	11,60
	0,90

Digitized by Google

VII. $0^{gr},932$ de matière ont donné par le même procédé :

Divisions neutralisant avant.....	25,15
Divisions neutralisant après.....	24,15
	1,00

J'ai vérifié ces deux analyses par le dosage en volumes :

VIII. Matière employée.....	$0^{gr},943$
Pression.....	0,753
Température.....	11°
Volume observé directement.....	$20^{cc},10$
Volume observé après absorption par Fe O, SO^3.	$19^{cc},50$

Ce qui correspond, en centièmes, à :

	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII
Acide tungst.	82,52	82,35	83,08	»	»	»	»	»
Eau de crist..	»	»	»	10,99	10,91	»	»	»
Azote.....	»	»	»	»	»	1,73	1,82	1,93

Ces analyses conduisent à la formule

$$Az\,H^4\,O,\,Tu^2\,O^6,\,3\,HO + 10\,Aq.$$

On a en effet :

$3\,Tu^2\,O^6$.....	666	83,31
Az.....	14	1,75
$H^4\,O$.....	2,37	0,29
3 HO.....	27	3,40
10 Aq.....	90	11,25
	799,37	100,00

On doit donc le considérer comme un métatungstate acide d'ammoniaque.

Ce sel jouit de la propriété caractéristique des métatungstates, de ne pas précipiter par les acides.

Il est beaucoup plus soluble que le précédent, puisqu'il se dépose dans ses eaux mères. 100 centimètres cubes d'eau froide en dissolvent 288 grammes ; quant à l'eau chaude, elle le dissout en toutes proportions, car ce sel fond dans

Digitized by Google

son eau de cristallisation ; sa saveur est analogue à celle du métatungstate prismatique, mais plus amère encore à cause de sa solubilité plus grande.

Il est insoluble dans l'alcool et dans l'éther, qui peuvent le précipiter de ses solutions aqueuses, si elles ne sont pas trop étendues.

L'acide sulfhydrique le jaunit et donne naissance à un sulfotungstate.

Lorsqu'on le fait bouillir avec de l'ammoniaque, on ne tarde pas à voir un trouble se former dans le liquide, et bientôt même il s'y dépose des cristaux nacrés très-abondants, quelque étendu qu'il soit. Ce dépôt est, comme nous l'avons indiqué, un tungstate d'ammoniaque fort peu soluble auquel nous avons attribué la composition

$$Az\,H^4\,O,\ 4\,Tu\,O^3,\ 3\,HO + Aq,$$

sel isomérique du métatungstate neutre d'ammoniaque.

Métatungstates métalliques.

Les métatungstates alcalins donnent, comme les tungstates, des précipités insolubles avec la plupart des dissolutions métalliques. J'ai cherché à les analyser ; mais il est impossible d'arriver à des formules exactes, parce qu'il se forme en même temps de l'acide tungstique insoluble. On constate seulement que ces sels renferment des proportions d'acide et de base différentes de celles que contiennent les tungstates et, par suite, que ces deux hydrates se combinent à toutes les bases pour donner des métatungstates distincts des tungstates proprement dits.

Le tableau suivant fera ressortir la vérité de cette assertion.

Digitized by Google

RÉACTIFS.	SELS A ACIDE INSOLUBLE. **Tungstates.** — Réaction alcaline.	SELS A ACIDE SOLUBLE. **Métatungstates.** Réaction acide presque nulle.
Chlorure de platine.....	Rien d'abord, puis précipité de chlorure double.	Id.
Chlorure d'or.....	Rien d'abord, à la longue précipitation d'ac. tungstique.	Id.
Nitrate d'argent	Précipité blanc abondant.	Id.
Bichlorure de mercure.....	Précipité blanc.	Id.
Nitrate de Hg^2O.	Précipité blanc jaunâtre.	Id.
Azotate de cuivre.....	Précipité blanc bleuâtre.	Rien même dans une liqueur très-concentrée.
Azotate de plomb.....	Précipité blanc.	Id.
Azotate de bismuth.....	Précipité blanc.	Id.
Sel d'antimoine.....	Précipité blanc jaunâtre.	Id.
Chlorure de cobalt.....	Précipité fleur de pêcher.	Pas de précipité.
Chlorure de nickel.....	Précipité vert.	Id.
Sulfate de protoxyde de fer..	Précipité jaune de rouille devenant couleur chocolat.	Précipité jaune rouille gardant cette teinte.
Sulfate de sesquioxyde de fer.	Précipité blanc jaunâtre.	Id.
Sulfate d'alumine.....	Précipité blanc.	Pas de précipité.
Sulfate de magnésie.....	Pas de précipité.	Id.
Chlorure de calcium.....	Précipité blanc très-abond.	Précipité blanc moins abondant.
Chlorure de strontium.....	Précipité blanc.	Pas de précipité.
Azotate de baryte.....	Précipité blanc abondant.	Id.
Cyanure jaune.....	Rien.	Rien.

Rien donc n'est plus certain que l'existence de deux modifications particulières d'acide tungstique.

Fallait-il en admettre, avec Laurent, trois ou quatre autres? C'est le point qui restait à éclaircir par l'expérience. Elle ne lui a pas donné raison.

J'ai suivi les prescriptions de Laurent avec l'attention la plus scrupuleuse, et j'ai préparé, à l'aide des moyens qu'il indique, l'hydrate d'acide tungstique et le tungstate d'ammoniaque correspondant à chacune des séries qu'il avait admises. L'analyse des hydrates et de ces sels ammoniacaux

Digitized by Google

prouve de la manière la plus évidente qu'ils peuvent tous être rapportés à deux types : l'acide tungstique et l'acide métatungstique.

On ne trouvera pas hors de propos que j'en mette les preuves détaillées sous les yeux des chimistes.

I. *Type tungstique,* HO, TuO^3 (Laurent). — Il admet dans ce type les tungstates neutres de potasse et de soude et tous les sels qui se représentent par la formule générale

$$RO, TuO^3.$$

J'ai précipité l'acide de ces deux sels à une basse température avec un acide faible pour ne pas décomposer l'hydrate; après l'avoir lavé, séché à une température de 50 degrés afin de ne pas l'altérer, je l'ai analysé, puis dissous dans l'ammoniaque. Le tungstate qui a cristallisé a été soumis à l'analyse.

Je ne citerai qu'un résultat :

$0^{gr},628$ de cet hydrate ont laissé 0,540 d'acide anhydre.

Ce qui produit, en centièmes :

Acide tungstique ...	85,98
Eau.....	14,02
	100,00

$0^{gr},758$ du tungstate d'ammoniaque ont donné 0,659 d'acide tungstique.

Ce qui correspond, en centièmes, à :

Acide tungstique.....	86,85

II. *Type paratungstique,* 2HO, $4TuO^3$ (Laurent). — Il contient les bitungstates de potasse, de soude et d'ammoniaque. L'hydrate et le sel, préparés comme plus haut, ont été analysés de même.

$0^{gr},350$ de l'hydrate ont laissé 0,300 d'acide tungstique anhydre.

Digitized by Google

Ce qui produit, en centièmes :

Acide tungstique....	85,71
Eau.....	14,29
	100,00

0^{gr},583 du sel ammoniacal ont donné 0,504 d'acide tungstique.

Ce qui correspond, en centièmes, à :

Acide tungstique.....	86,44

Cet hydrate présente donc la même composition que le précédent, et tous deux fournissent le même sel d'ammoniaque.

III. *Type métatungstique*, HO, 3TuO^3 (Laurent.) — C'est celui-là qui contient l'acide soluble, je n'ai rien à ajouter aux développements donnés plus haut.

IV. *Type isotungstique*, HO, 2TuO^3 (Laurent). — « L'isotungstate d'ammoniaque s'obtient, dit-il, en faisant » bouillir le métatungstate d'ammoniaque avec un excès » d'ammoniaque; ce sel, traité par une goutte d'acide ni- » trique faible, donne un dépôt gélatineux semblable à » l'acide tungstique, mais il possède des propriétés diffé- » rentes. En effet, si on le traite immédiatement par l'am- » moniaque, il régénère l'isotungstate. »

J'ai répété cette expérience :

0^{gr},501 de l'hydrate ont laissé 0,429 d'acide anhydre.

Ce qui fournit, en centièmes :

Acide tungstique....	85,62
Eau.....	14,38
	100,00

0^{gr},491 du sel d'ammoniaque ont donné 0,424 d'acide tungstique ou encore 86,35 pour 100 du sel.

Laurent ajoute : « Lorsqu'on fait tomber goutte à goutte

Digitized by Google

» une solution de paratungstate de soude dans un excès » d'acide chlorhydrique bouillant, il se forme un dépôt » jaune dont l'aspect ressemble à celui de l'acide qu'on ob- » tient en traitant le wolfram par l'eau régale, il en pos- » sède la composition; mais chauffé, ses propriétés sont » différentes. Chauffé à 200 degrés, il perd la moitié de » l'eau qu'il renferme, et traité par l'ammoniaque, il » régénère l'isotungstate. »

J'ai obtenu, en effet, un dépôt jaune dans les circonstances précédentes, mais :

$0^{gr},837$ de cet hydrate ont laissé 0,773 d'acide tungstique.

Ce qui fournit, en centièmes :

Acide tungstique....	92,36
Eau.....	7,64
	100,00

L'hydrate est donc différent du précédent; cependant le sel d'ammoniaque est le même, car

$0^{gr},753$ de sel ont donné 0,645 d'acide tungstique,

ce qui correspond à 85,85 d'acide tungstique.

V. *Type polytungstique* (Laurent). — Je n'ai pu réaliser aucune expérience sur les corps de cette série, car Laurent dit lui-même :

« N'ayant analysé aucun polytungstate si ce n'est celui » d'hydrogène, je ne donne les formules qu'avec beaucoup » de réserve. »

Nous avons donc trouvé en résumé :

Dans les hydrates analysés :

	Ac. tungstique.	Eau.
Hydrates du type tungstique.....	85,98	14,02
Hydrates du type paratungstique.	85,71	14,34
Hydrates du type isotungstique à froid.	85,62	14,34
Hydrates du type isotungstique à chaud	92,36	7,68

Digitized by Google

Dans les sels ammoniacaux :

	Ac, tungstique.
Sel du type tungstique.....	86,85
Sel du type paratungstique....	86,44
Sels du type isotungstique.....	86,35
	85,85

Or les nombres de ces analyses conduisent à la formule de l'acide tungstique hydraté ordinaire obtenu à froid :

$$2\,HO,\ Tu\,O^3,$$

qui donne

2 HO.....	18	13,94
$Tu\,O^3$.....	111	86,06
	129	100,00

Quant au dernier, il répond exactement à la formule de l'acide tungstique hydraté ordinaire préparé à chaud :

$$HO,\ Tu\,O^3.$$

En effet

HO.....	9	7,50
$Tu\,O^3$.....	111	92,50
	120	100,00

Ces résultats me forcent à conclure que l'on ne peut admettre en aucune façon l'existence des acides tungstiques extraordinaires qui correspondraient aux types paratungstique, isotungstique et polytungstique.

Les erreurs commises par Laurent tiennent à la méthode qu'il a suivie pour analyser les tungstates d'ammoniaque, seuls sels sur lesquels il ait opéré.

Après avoir donné les formules de dix-neuf sels, parmi lesquels il s'en trouve sept qui renferment de l'ammoniaque (1), il ajoute, en effet :

---

(1) Il représente ces sels par les formules suivantes :

Paratungstate d'ammoniaque..... $Tu^4O^{14}, (AzH^4)^{\frac{10}{3}}H^{\frac{2}{3}} + 3Aq,$

Paratungstate d'ammoniaque cristal-

Digitized by Google

« Lorsqu'on chauffe ces tungstates à 200 degrés environ, » ils perdent leur eau de cristallisation, et si on les traite » par l'eau, ils s'y redissolvent en cristallisant sous leur » forme primitive. »

J'ai répété maintes fois cette opération, et j'ai constaté qu'à 200 degrés, qu'à 160 degrés même, l'eau de cristallisation qui se vaporisait entraînait une proportion notable d'ammoniaque. Je n'ai trouvé, je le répète, que deux modifications de l'acide tungstique; les autres n'ont, je pense, jamais existé; les formules données par M. Laurent étant établies sur des erreurs d'analyse faciles à constater, il n'y a plus lieu de chercher l'explication des équivalents fractionnaires qu'il y faisait entrer.

Iodure et sels de méthyltungstène.

Si on chauffe du tungstène dans un tube en verre vert scellé à la lampe avec de l'iodure d'éthyle, et que la température soit la plus élevée que puisse donner un bain d'huile, il y a une légère altération du métal, car des flocons d'oxy-iodure nagent dans le liquide; mais la réaction a été si peu sensible, même au bout de trois jours de contact, que j'ai dû renoncer à poursuivre l'expérience.

Quand on remplace l'iodure d'éthyle par de l'iodure de méthyle, et qu'on emploie au lieu du tungstène cristallisé

---

lisé dans l'eau chaude. ..... $Tu^4O^{14}, (AzH^4)^{\frac{10}{3}} H^{\frac{2}{3}} + Aq,$

Paratungstate d'ammoniaque cristallisé dans l'eau chaude. ..... $Tu^4O^{14}, (AzH^4)^3 H + 2Aq,$

Paratungstate de potasse et d'ammon. $Tu^4O^{14}, K^{\frac{12}{6}} (AzH^4)^{\frac{7}{6}} H^{\frac{4}{6}} + 3Aq,$

Paratungstate de soude et d'ammoniaque..... $Tu^4O^{14}, AzH^4 Na^2 H + 8Aq,$

Paratungstate de potasse, de soude et d'ammoniaque..... $Tu^4O^{14}, K^{\frac{2}{6}} Na^{\frac{2}{6}} (AzH^4)^{\frac{12}{7}} H^{\frac{4}{6}} + 4Aq,$

Paratungstate de potasse, de soude et d'ammoniaque..... $Tu^4O^{14}, KNa (AzH^4)^{\frac{4}{3}} + H^{\frac{2}{3}} + Aq.$

Digitized by Google

le tungstène pulvérulent, obtenu à une plus basse température par la réaction du sodium sur le chlorure de tungstène, le résultat est plus net; le liquide distillé donne, outre l'iodure de méthyle employé en excès, une substance visqueuse bouillant à une température élevée. Si on l'agite avec deux fois son volume d'alcool éthéré un peu chaud, il reste une huile indissoute qui se précipite au fond; l'alcool abandonné à l'évaporation spontanée laisse déposer une substance fusible vers 110 degrés, et cristallisée en aiguilles qui se groupent en rosaces ou en étoiles. Cette substance est insoluble dans l'eau, se dissout assez bien dans l'alcool et mieux encore dans l'éther.

Les acides la décomposent en mettant de l'iode en liberté; chauffée sur une lame de platine, elle fond, se réunit en gouttes oléagineuses, et brûle en développant des vapeurs d'iode.

Les analyses de ce corps conduisent à la formule

$$3\,(C^2H^3)\,Tu, I.$$

En effet :

I. $0^{gr},2705$ de cette matière séchée sur de la chaux ont donné 0,355 d'acide carbonique et 0,225 d'eau.

II. $0^{gr},354$ d'un autre échantillon ont donné 0,172 d'iode.

On en déduit, en centièmes :

	I.	II.
Carbone.....	13,730	»
Hydrogène.....	3,545	»
Oxygène... ...	»	»
Iode.....	»	48,58
Tungstène.....	»	»

Et la formule citée plus haut donne les résultats suivants :

C^6.....	36	13,956
H^9.....	9	3,491
Tu..	87	33,716
I.....	126	48,837
	258	100,100

Digitized by Google

Si l'on fait réagir sur cet iodure le sulfate d'argent, il se forme un précipité jaune d'iodure d'argent, et la liqueur filtrée abandonne, après évaporation dans le vide, des cristaux très-déliquescents qui se décomposent vers 200 degrés, sont peu solubles dans l'éther, mais se dissolvent avec facilité dans l'alcool à 40 degrés.

Une double décomposition semblable a lieu avec le nitrate d'argent, et il se forme un nitrate plus déliquescent encore que le sulfate, qui reste toujours à l'état d'une pâte visqueuse et gluante. Ces deux sels s'obtiennent pareillement en dissolvant l'oxyde dans l'acide nitrique ou dans l'acide sulfurique.

On prépare le chlorure correspondant à l'iodure en saturant l'oxyde par l'acide chlorhydrique concentré, mais on peut de préférence décomposer l'iodure par une solution chaude de bichlorure de mercure; le liquide, débarrassé par le filtre de l'iodure de mercure précipité, donne par évaporation de petits cristaux grenus de chlorure qu'on purifie par un traitement à l'alcool concentré.

Analogies du tungstène.

Maintenant que le tungstène et ses divers composés nous sont connus, je vais passer en revue ses principales propriétés, afin de fixer le mieux possible sa place dans la longue liste de nos corps simples.

On l'a classé avec raison auprès de l'étain et de l'antimoine, mais il doit être rangé au delà de ces métaux, par rapport au potassium; car, s'il décompose, comme eux, l'eau en présence des alcalis, il exige une température plus élevée qu'eux pour s'oxyder au contact de l'air.

Toutes ses propriétés le rapprochent de ces corps.

Ainsi, son principal oxyde jouit, comme les leurs, des propriétés acides; son chlorure décompose l'eau comme ceux de ces métaux; il donne naissance à des sulfosels analogues à ceux que produit l'antimoine, etc.

Digitized by Google

Le tungstène présente avec ce dernier un trait de ressemblance tout particulier, qu'il importe, je crois, de faire ressortir ; c'est que tous deux, placés à la limite des métaux, ont un certain nombre de caractères communs aux métalloïdes, et ne sont pour ainsi dire que des demi-métaux, comme disaient les anciens chimistes.

Ceci est mis hors de doute pour l'antimoine, et l'on fait en général bon marché de son aspect pour le ranger dans la famille de l'azote, du phosphore et de l'arsenic ; je vais montrer qu'il doit en être de même du tungstène.

Quand on veut définir les métalloïdes et les différencier des métaux, on dit : 1° Les métalloïdes se combinent à l'oxygène pour former des oxydes neutres ou acides, et jamais basiques ; l'inverse a lieu pour les métaux ; 2° les métalloïdes se combinent à l'hydrogène ; il n'y a au contraire qu'un très-petit nombre de métaux qui s'unissent à ce corps ; 3° le métalloïde est terne, tandis que le métal présente un éclat prononcé ; le premier ne peut se laminer, se tirer en fils, tandis que l'on fait aisément des lames ou des fils avec le second.

Si le tungstène présentait les trois caractères propres aux métalloïdes, je n'hésiterais pas à le ranger parmi eux, mais il me paraît ne les présenter qu'à demi ; c'est pourquoi je dis qu'on doit le considérer comme un intermédiaire entre les métalloïdes et les métaux.

Il s'unit à l'oxygène, mais il donne naissance par sa combinaison avec ce corps à un acide, l'acide tungstique ; on connaît, il est vrai, un autre oxyde de tungstène, mais ce nouveau composé est neutre, et je n'ai pu le faire entrer à l'état de base dans aucun sel. Le tungstène joue donc vis-à-vis de l'oxygène le rôle d'un métalloïde.

Il ne se combine pas avec l'hydrogène ; mais le bore et le silicium dont je le rapproche ne s'y unissent pas davantage.

Le tungstène est opaque, ce qui le rapproche des mé-

Digitized by Google

taux; il est brillant, mais il ne peut se couler, s'étirer en fils ou se réduire en lames. Traité comme le platine, il ne prend pas les caractères extérieurs d'un métal, mais reste en petits grains cristallins. On l'obtient même sous forme d'une poudre terne et amorphe par l'action de son chlorure sur le sodium, caractère qu'il partage avec le bore et le silicium.

Si l'on passe en revue les métalloïdes, on trouve que le bore, le silicium et le zirconium semblent se rapprocher du tungstène, non-seulement par leur aspect, mais encore par l'ensemble de leurs propriétés chimiques.

Le tungstène amorphe est plus actif que le tungstène cristallin ; ce que l'on sait être vrai pour le bore et le silicium.

Les équivalents de ces quatre corps présentent les rapports simples que l'on est habitué à rencontrer dans les familles bien caractérisées.

Ainsi l'équivalent du bore = 11 fois celui de l'hydrogène.
» silicium = 22 = 2 × 11
» zirconium = 68 = 6 × 11 à peu près.
» tungstène = 87 = 8 × 11 à peu près.

Il n'y a qu'un chlorure de tungstène bien défini; sa formule et celle de l'acide tungstique $Tu O^3$ correspondent à celle du chlorure de silicium $Si Cl^3$ et à celle de l'acide silicique $Si O^3$.

L'acide tungstique et les tungstates présentent avec l'acide silicique et les silicates de grandes analogies. Ainsi, les deux acides précipités à froid se présentent à l'état de flocons gélatineux ; ils sont l'un et l'autre solubles dans les alcalis, et quelquefois solubles dans les acides. Il est enfin une variété de chacun d'eux qui ne jouit presque plus de la propriété de se dissoudre dans les alcalis.

Il en est de même des autres réactions de ces deux sub-

Digitized by Google

stances, et on peut tirer de l'étude de l'acide tungstique et des tungstates les conclusions dans lesquelles M. Doveri a résumé ses recherches sur l'acide silicique et les silicates (1).

Nous allons les passer successivement en revue :

1°. L'acide silicique, dit-il, n'est soluble dans les acides qu'à l'état naissant, lorsque les molécules se trouvent assez éloignées entre elles ou entourées d'un excès d'acide.

L'acide tungstique n'est soluble aussi que quand il est mis non agrégé en présence de liqueurs acides ; mais cette solubilité ne tient pas à l'état naissant de la matière : ce mot-là n'est employé ici, comme dans la plupart des cas, que pour déguiser notre ignorance ; la véritable raison est la formation d'un hydrate soluble, hydrate dont l'existence est démontrée pour l'acide tungstique, et dont de nouvelles recherches sur l'acide silicique amèneraient peut-être la découverte.

2°. Suivant M. Doveri, la silice une fois précipitée devient tout à fait insoluble dans les acides.

Il en est de même de l'acide tungstique; quelle que soit son origine, on ne peut lui rendre sa solubilité primitive si on la lui a enlevée par un des moyens cités plus haut.

3°. Les acides faibles, comme les acides végétaux, l'acide sulfureux, l'acide borique, décomposent les silicates alcalins à la température ordinaire et en précipitent la silice.

Ceci est vrai pour l'acide tungstique.

4°. L'acide tungstique fond comme l'acide borique et l'acide silicique, et donne comme eux un verre transparent au moment où on le coule, mais qui devient opaque au bout de quelque temps.

5°. Quand l'eau et l'acide tungstique s'unissent, c'est

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, tome XXI, page 40.

Digitized by Google

pour donner naissance, comme l'acide silicique, à des hydrates définis qui sont au nombre de deux : l'un, produit à une basse température, a pour formule

$$2\,HO,\ Tu\,O^3;$$

l'autre, préparé dans des liqueurs bouillantes, présente la composition

$$HO,\ Tu\,O^3.$$

6°. Lorsqu'on traite un silicate alcalin par une solution métallique, le précipité renferme de la silice libre; le même fait se présente dans la préparation des tungstates insolubles.

Il y a donc, entre le silicium et le tunsgtène métalliques, entre l'acide silicique et l'acide tungstique, entre les silicates et les tungstates, certains points de contact assez bien établis.

Mais ces analogies sont accompagnées de différences notables; la densité du tungstène est très-considérable, si on la compare à celle des métalloïdes en général; son volume atomique diffère beaucoup de celui du silicium en se rapprochant de celui du bore, et c'est ordinairement le contraire qui a lieu, comme M. Dumas l'a fait voir depuis longtemps dans ses leçons.

Les oxydes du tungstène sont colorés; ceux des corps non métalliques sont incolores. L'eau, qui décompose le sulfure de silicium, n'agit pas sur les sulfures de tungstène.

Il ne faut donc pas attacher trop d'importance à la réunion de ces corps dans une même famille; ce que je veux mettre en évidence, c'est que le tungstène ne jouit pas des propriétés d'un métal dans toute l'acception du mot, qu'il doit se ranger parmi ces corps intermédiaires entre les métalloïdes et les métaux, tels que le tellure, l'antimoine, le zirconium, le silicium, le bore, et servir, comme eux, de lien entre ces deux grandes séries de corps simples, qui, si éloignées dans leurs termes extrêmes, se rapprochent dans

Digitized by Google

quelques espèces et se confondent dans un certain nombre d'éléments dont les propriétés participent à la fois de celles des métaux et de celles des métalloïdes.

Il m'est doux, en terminant, de remercier M. Dumas pour les conseils bienveillants qu'il n'a cessé de me donner pendant le cours de ces recherches, exécutées au laboratoire de la Faculté des Sciences de Paris.

OBSERVATIONS ET EXPÉRIENCES SUR L'EMPLOI DE L'IODURE DE POTASSIUM COMME RÉACTIF DE L'OZONE;

PAR M. S. CLOEZ.

Mémoire communiqué à l'Académie des Sciences le 7 juillet 1856.

On connaît aujourd'hui en chimie un certain nombre de corps susceptibles d'éprouver, sous diverses influences, des modifications moléculaires qui peuvent changer quelquefois d'une manière complète leurs propriétés physiques, chimiques et organoleptiques. Le soufre et le phosphore en sont des exemples bien connus : ces corps, soumis à l'action de la chaleur dans des conditions convenables et parfaitement déterminées, acquièrent des propriétés nouvelles fort différentes de celles qu'ils ont dans leur état ordinaire. Le chlore également, sous l'influence d'une insolation très-forte suffisamment prolongée, paraît passer à l'état d'une modification allotropique remarquable surtout par ses propriétés comburantes beaucoup plus développées que celles du chlore non insolé.

L'électricité, comme la chaleur et la lumière, peut changer les propriétés des corps; c'est ainsi que l'oxygène électrisé possède des propriétés plus actives que l'oxygène ordinaire retiré du chlorate de potasse par l'action de la chaleur.

Digitized by Google

L'oxygène produit par la décomposition de l'eau au moyen de la pile, possède aussi ce surcroît d'activité; il en est de même encore d'après M. Houzeau, de celui que l'on obtient à l'état naissant en traitant le bioxyde de barium par l'acide sulfurique à une basse température.

On a cru d'abord que cette différence dans les propriétés de l'oxygène pouvait être attribuée à une matière particulière étrangère à ce gaz; on a été même jusqu'à créer un nom spécial, le nom d'*ozone,* pour désigner cette substance indéterminée dont on n'a jamais pu jusqu'ici démontrer la nature ni l'existence en dehors de l'oxygène.

Les expériences déjà anciennes de M. Marignac, celles que MM. Fremy et Ed. Becquerel ont faites dans ces derniers temps, ont le plus contribué à éclaircir la question de la nature de l'ozone, en démontrant de la manière la plus évidente la possibilité de donner à l'oxygène chimiquement pur les propriétés caractéristiques de cette substance mystérieuse.

L'iodure de potassium est une des matières les plus sensibles à l'action de l'oxygène ozoné. Il y a de l'iode mis en liberté dans la réaction, et si l'on a préalablement ajouté de l'amidon désagrégé au sel alcalin, il se produit une coloration bleue caractéristique facile à constater. Ce réactif exige des précautions particulières pour sa préparation; on réussit à coup sûr en dissolvant à chaud 10 grammes d'amidon broyé dans 1 litre d'eau et ajoutant 2 grammes d'iodure de potassium; on laisse refroidir la liqueur, puis on la verse dans une cuvette en porcelaine à fond plat, peu profonde et de forme rectangulaire; on y trempe ensuite des feuilles de papier fin non collé, à surface bien unie, que l'on fait sécher sur une corde tendue dans un endroit chaud et sec; enfin on coupe ce papier en petites bandes pour le conserver à l'abri de la lumière et des vapeurs acides dans une boîte en carton, ou, mieux encore, dans un flacon bouché recouvert de papier noir. Ce réactif est connu sous le nom

Digitized by Google

bien impropre de réactif *ozonométrique* ou *ozonoscopique;* il peut servir, d'après quelques auteurs, non-seulement à montrer la présence de l'ozone, mais encore à mesurer assez exactement la proportion que l'air en renferme.

Le travail expérimental sur la nitrification que j'ai eu l'honneur de soumettre l'an dernier au jugement de l'Académie, m'a conduit à rechercher quelle part l'oxygène ozoné, qu'on dit exister dans l'air, peut avoir dans la formation de l'acide azotique et par suite des azotates. Je dois avouer que jusqu'ici, après un très-grand nombre d'expériences, je n'ai pas encore pu établir avec certitude le rôle de l'ozone dans le phénomène de la nitrification opérée en l'absence des matières azotées ou ammoniacales; mais si mes expériences ont peu éclairci la question principale que je cherchais à résoudre, elles ont au moins servi à me convaincre que les nombreux essais faits dans le but de constater la présence de l'ozone dans l'air et d'en mesurer la quantité au moyen du papier sensible ioduré n'ont aucune espèce de valeur.

Les expériences qui servent de base à ma conviction ont été faites constamment avec toute la rigueur que le sujet comporte; je ne me suis pas contenté d'exposer à l'air un morceau de papier pour le voir se colorer, et conclure, en quelque sorte arbitrairement, que la coloration est produite par l'ozone ou par toute autre cause; je me suis attaché surtout à déterminer les circonstances principales auxquelles on peut attribuer cette coloration. C'est là, il me semble, le point essentiel de la question, celui que l'on doit le plus s'efforcer d'éclaircir quand on s'occupe de recueillir des observations ozonométriques. J'ai donc cherché d'abord à constater comparativement la manière dont le papier sensible se comporte à l'air libre, en pleine campagne, loin de toute habitation, dans des lieux recouverts ou dépourvus de végétaux; et à Paris, dans les quartiers les plus popu-

Digitized by Google

leux, ainsi que dans les parcs ou jardins publics d'une certaine étendue qui les avoisinent. Je passe ensuite à l'examen d'une question qui n'a point encore été résolue expérimentalement : c'est de savoir si le gaz dégagé par les parties vertes des plantes exposées à la lumière possède, comme certaines personnes le prétendent, les propriétés actives de l'oxygène électrisé ou ozoné. Enfin, mon travail se termine par un certain nombre d'expériences sur l'action des éléments constituant l'atmosphère et des matières qui peuvent s'y rencontrer accidentellement, sur le réactif ioduré placé dans un espace clos et exposé comparativement à la lumière ou dans l'obscurité, en l'absence ou en présence de l'humidité.

Coloration du papier sensible ioduré, exposé à l'air libre.

On sait depuis longtemps que le papier ioduré exposé à l'air libre se colore généralement au bout d'un temps plus ou moins long, suivant la saison et aussi suivant les lieux : on admet comme un fait constant que la coloration a lieu presque journellement à la campagne, dans les lieux où il y a des arbres nombreux et où la végétation est la plus active ; il résulte aussi d'un grand nombre d'observations que dans certains quartiers des villes populeuses, dans les endroits surtout où l'agglomération des habitants est la plus grande, et que l'on considère avec juste raison comme les plus malsains, le papier sensible ne se colore jamais, ou ne se colore que fort rarement et d'une manière très-faible.

J'ai été souvent à même d'observer des faits conformes à ceux que je viens de rappeler, seulement je n'admets point, comme la plupart des observateurs, que l'oxygène actif ou l'ozone soit l'unique cause de la coloration ; j'ai tout lieu de croire, comme les faits contenus dans ce Mémoire le démontreront, que cette cause est beaucoup plus complexe qu'on ne le pense généralement.

Mes expériences sur la formation du nitre se font simul-

Digitized by Google

tanément en plein air, au Muséum d'histoire naturelle et à l'École Polytechnique : l'appareil du Muséum est établi dans le carré des couches, devant l'Orangerie; celui de l'École est monté sur une des terrasses de l'amphithéâtre de chimie, du côté de la rue d'Arras. Le premier lieu est environné de plantes de toutes sortes et principalement d'arbres résineux; le papier destiné à indiquer la présence de l'ozone s'y colore constamment et souvent en très-peu de temps; à l'École Polytechnique, au contraire, les arbres sont très-rares et placés à une grande distance de l'endroit où l'appareil est monté, il y a en outre dans les environs une population nombreuse agglomérée dans des habitations malsaines; le papier ioduré exposé à l'air dans les mêmes conditions de température et de lumière que celui du Muséum ne s'est pas coloré une seule fois depuis six mois.

On peut considérer comme un fait général que, partout où il y a un grand nombre d'habitants réunis sur un petit espace, le papier sensible ne se colore pas à l'air. J'ai fait dans différents endroits de Paris et des environs de nombreux essais dont les résultats ont toujours été les mêmes, c'est-à-dire qu'il y a eu coloration du papier dans les lieux où il y a des plantations et peu d'habitants, et qu'il y a toujours eu absence de coloration dans les quartiers populeux de la ville, où les arbres sont rares, ou manquent complétement.

M. Cahours a constaté un fait semblable dans le courant de février dernier, en exposant simultanément des bandes de papier à Paris, dans la cour de l'hôtel de la Monnaie, et à Neuilly dans le jardin attenant à son habitation; le réactif exposé à Paris ne présentait aucune trace de coloration au bout de soixante-douze heures, tandis que celui de Neuilly était déjà fortement coloré après six heures d'exposition. Il y a déjà plusieurs années que M. Bineau a observé des phénomènes analogues à Lyon et à Paris. Ce chimiste attribue à la présence de l'ozone une coloration qui peut être

Digitized by Google

due tout aussi bien à d'autres causes, dont une des plus efficaces, à mon avis, réside dans les substances volatiles que les végétaux cèdent à l'atmosphère. Mon opinion est fondée sur quelques expériences fort simples, très-faciles à répéter et qui me paraissent tout à fait concluantes.

Vers le commencement du mois de mars, j'ai fait placer dans un endroit d'une plaine de la Picardie, où il n'y a pas un seul arbre dans un rayon de plus de 3 kilomètres, une bande de papier ioduré attachée à l'extrémité d'une baguette fichée dans le sol; non loin de là, à une distance de 4 kilomètres environ, se trouve un parc où il y a quelques arbres verts; on y plaça une bande de papier semblable à la première; au bout de quatre heures elle avait déjà acquis une coloration brune-violacée bien sensible, tandis que celle de la plaine était encore parfaitement blanche après deux jours d'exposition à l'air.

Un élève interne des plus distingués des hôpitaux de Paris, M. Gury, aujourd'hui pharmacien à Metz, a fait à ma prière, vers le commencement d'avril, dans les environs de la ville qu'il habite, une expérience toute semblable et dont les résultats ont été identiques. Le phénomène a été même encore plus marqué, car la bande de papier placée dans une plantation d'arbres résineux, tels que pins, sapins et mélèzes, était déjà fortement colorée après une heure d'exposition, tandis que la bande pareille mise dans le même temps en plein champ, à 1 kilomètre environ de la première, n'a commencé à se colorer légèrement qu'au bout de quatre heures. Il résulte de cette expérience, comme des précédentes, que la proximité des arbres exerce une grande influence sur la coloration du réactif ioduré. Maintenant, on peut se demander si tous les arbres, si toutes les plantes, possèdent ce pouvoir au même degré. Sur ce point il est permis de répondre négativement : les arbres résineux, les plantes aromatiques, toutes les parties des végétaux qui don-

Digitized by Google

nent des huiles essentielles à la distillation, agissent beaucoup plus vivement que les plantes inodores. Cette assertion est le résultat des nombreuses observations que j'ai eu l'occasion de faire dans le cours de mon travail, et dont je ne rapporterai que les principales.

Le jardin des Tuileries, sous le rapport du nombre des arbres, est à peu près dans les mêmes conditions que le Jardin des Plantes; l'exposition aussi est semblable, mais les arbres sont d'essences différentes : aux Tuileries, les tilleuls et les marronniers dominent; au Jardin des Plantes, du côté du labyrinthe, il n'y a presque que des arbres verts laissant exhaler continuellement des huiles essentielles dans l'air environnant. On a exposé simultanément, vers le milieu du mois de mai, des bandes de papier ioduré dans les deux endroits : aux Tuileries, la coloration n'a commencé à être sensible qu'au bout de trente-six heures; au Jardin des Plantes, elle était déjà très-foncée après huit heures d'exposition, la première fois qu'on l'a observée.

La différence dans les résultats peut être due ici à une cause dont je n'ai pu saisir l'influence; pour m'éclairer, j'ai fait de nouveaux essais dont les résultats confirment pleinement ma manière de voir. Ces essais consistent à faire passer un courant d'air débarrassé de vapeurs acides et ammoniacales sur des plantes renfermées sous une cloche en verre tubulée, à la suite de laquelle se trouve le réactif ioduré placé dans un tube recouvert de papier noir. Toutes les fois que la plante est susceptible de fournir des émanations volatiles odorantes, comme les arbres verts, les tiges de menthe poivrée, etc., le papier se colore dans un espace de temps souvent très-court, mais nécessairement variable, et dont il est difficile de fixer les limites, à cause des circonstances également variables de l'expérience. Avec les plantes herbacées inodores, telles que les jeunes tiges de bourrache, de laitue cultivée, de betterave, etc., le papier réactif

Digitized by Google

est resté parfaitement blanc jusqu'à la fin des expériences, dont la durée pour chacune d'elles a été invariablement de quarante-huit heures.

Action de l'oxygène dégagé par les parties vertes des plantes sur le papier ioduro-amidonné.

Des expériences publiées récemment par différents observateurs tendent à prouver que l'oxygène dégagé par les parties vertes des plantes, au moment où la lumière les frappe, se trouve dans le même état que le gaz produit par la décomposition de l'eau au moyen de la pile, c'est-à-dire que c'est de l'oxygène actif, de l'oxygène à l'état naissant, ou, comme on l'appelle encore, de l'ozone. S'il en était ainsi, on comprendrait pourquoi en été le voisinage des arbres est favorable à la coloration du papier; mais en hiver, au moment où la température est souvent inférieure à 10 degrés, alors que la végétation est tout à fait suspendue et que le dégagement d'oxygène a cessé, comment s'expliquer la coloration souvent plus rapide et plus intense que celle qu'on observe dans les mêmes lieux pendant l'été ? C'est une objection à laquelle il serait assez difficile de répondre.

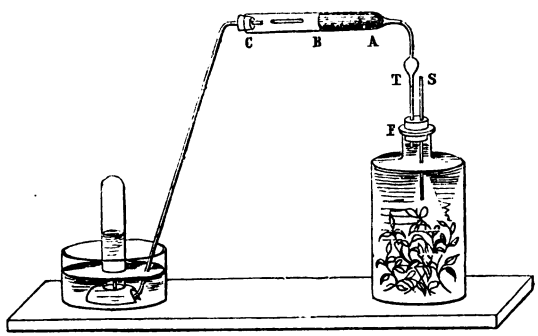
Je me suis assuré par une expérience directe que l'oxygène dégagé des plantes n'a aucune action sur le papier sensible. A cet effet, j'ai mis des plantes aquatiques dans un flacon rempli d'eau de Seine, contenant environ la moitié de son volume d'acide carbonique en dissolution; j'ai exposé l'appareil au soleil et j'ai fait passer au moyen d'un tube adducteur le gaz produit, sous une éprouvette remplie d'eau. D'après l'analyse que j'en ai faite, ce gaz contenait pour 100 parties en volume :

Acide carbonique..	1,8
Oxygène.....	85,7
Azote.....	12,5
	100,0

Digitized by Google

Une portion du gaz a été mise en contact avec le papier ioduré. Au bout de six heures, il n'y avait pas encore eu décomposition; le réactif était aussi blanc qu'au moment de son introduction dans l'éprouvette. Je ne m'en suis pas tenu à cette expérience, parce qu'on pourrait dire que le gaz exhalé a perdu son pouvoir oxydant pendant le court espace de temps qu'il a fallu pour en recueillir une quantité suffisante : j'ai disposé un appareil très-simple, de manière que le gaz oxygène se trouvât en contact avec le papier sensible, immédiatement après sa production. Je prends à cet effet un flacon en verre de 10 litres environ de capacité, *fig.* 1, je le remplis d'eau chargée d'acide carbonique, et je

Fig. 1.



mets dans l'eau des plantes aquatiques submergées, telles que des *Potamogeton*, ou des *Ceratophyllum*, toutes plantes qui décomposent rapidement l'acide carbonique sous l'influence de la lumière, en donnant de l'oxygène mélangé de quelques centièmes de gaz azote, comme nous l'avons vu précédemment. L'ouverture du flacon F est munie d'un bouchon traversé par deux tubes S et T; le premier sert de tube de sûreté à double effet, pour la sortie de l'eau de l'appareil, et la rentrée de l'air; le second tube coudé sert au passage du gaz, il porte un renflement à sa partie ascendante, à une hauteur de 1 décimètre, un peu au-dessus de l'extrémité supérieure du tube S; la branche horizon-

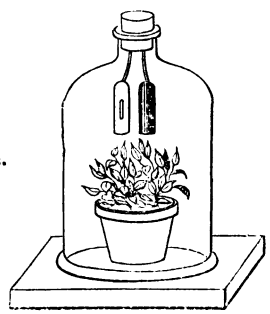
Digitized by Google

tale est soudée à un tube de 2 centimètres de diamètre, et de 30 centimètres de long; la moitié du tube la plus rapprochée du flacon est recouverte de A en B de papier noir; on place dans son intérieur une bande de réactif ioduré; on en met une également dans la partie BC, qui doit rester exposée à l'action de la lumière; enfin l'appareil est terminé par un tube de dégagement destiné à amener le gaz sous une cloche remplie d'eau.

Un appareil ainsi disposé a été soumis à l'action de la lumière solaire pendant deux jours, le jeudi 3 et le vendredi 4 juillet; il s'est dégagé pendant ce temps $2^{lit},25$ de gaz humide qui a passé entièrement sur la bande de papier réactif placée dans la partie obscure du tube, ainsi que sur celle qui était dans la partie éclairée; après l'expérience, la première fut retirée du tube aussi blanche qu'au moment de son introduction : l'iodure alcalin n'avait subi aucune modification de la part de l'oxygène dégagé par les plantes; la seconde bande s'était fortement colorée par une cause indépendante de la présence des plantes dans le flacon.

On arrive à des résultats tout semblables au moyen de plusieurs autres expériences, dont on peut d'ailleurs faire varier beaucoup les conditions. Une des plus simples, mais de nature cependant à satisfaire les esprits les plus difficiles, consiste à prendre une cloche en verre, *fig.* 2, de 20 à

Fig. 2.



25 litres de capacité, et à suspendre dans l'intérieur à son

Digitized by Google

sommet, à côté l'une de l'autre, deux petites éprouvettes à gaz parfaitement semblables, dans chacune desquelles on fixe une bandelette de papier sensible; l'une de ces éprouvettes est recouverte de papier noir, tandis que l'autre doit laisser passer les rayons lumineux. En plaçant la cloche ainsi disposée sur une plante non aromatique, sur une touffe de gazon, sur du coton humide, ou même tout simplement sur une assiette recouverte d'une faible couche d'eau, et exposant le tout à la lumière, on voit constamment la bande de papier éclairée se colorer, tandis que celle qui est placée dans l'obscurité reste tout à fait blanche. Il est essentiel ici de noter que, sauf la lumière, les conditions sont les mêmes pour les deux bandes de papier; c'est donc bien, comme dans l'expérience précédente, à l'action directe de cet agent qu'il faut attribuer la coloration, et non pas à l'oxygène secrété par les parties vertes des plantes, ou au gaz qui se dégage, selon M. Scoutetten, de l'eau aérée ordinaire soumise à l'action de la lumière. Il découle en outre de ces expériences une autre conséquence: c'est que la lumière n'ozonise pas l'air; car s'il y avait ozonisation, il est évident que la bandelette de papier sensible placée dans l'obscurité se colorerait aussi bien que celle qui est exposée à la lumière.

Action de la lumière sur le papier ioduré, dans un espace clos, en présence de l'air et de ses principes constituants.

Nous venons de voir dans les expériences précédentes le papier ioduré se colorer dans l'oxygène humide sous l'influence de la lumière directe du soleil; ce n'est point un fait accidentel : il se produit toujours dans des circonstances semblables, chaque fois qu'on fait agir la lumière sur le papier sensible, en présence de l'air et de la vapeur d'eau; il se produit même lorsque la proportion d'oxygène ne forme que les $\frac{5}{1000}$ du volume de l'air.

M. Chevreul a constaté depuis longtemps que la laine

Digitized by Google

teinte en noir par le sulfure de plomb, exposée à la lumière dans les mêmes conditions que le papier ioduré, ne tarde pas à blanchir ; cela tient à l'oxydation rapide du sulfure métallique et à sa transformation en sulfate de plomb, qui est blanc. M. Schœnbein paraît n'avoir pas eu connaissance des travaux déjà anciens de M. Chevreul relatifs à l'action de la lumière sur les substances colorées, en publiant le Mémoire où il indique le fait du changement du sulfure de plomb noir en sulfate blanc, et en attribuant à l'ozone cette transformation. Mais de ce que l'oxygène de l'air peut agir plus énergiquement sur les corps oxydables, à la lumière solaire qu'à la lumière diffuse et à fortiori dans l'obscurité, doit-on conclure forcément que cet oxygène a été ozoné? Je ne le crois pas, et j'ai déjà eu l'occasion d'en donner la raison. Au surplus, bien que la modification active de l'oxygène ne soit pas permanente, on peut néanmoins la maintenir pendant plusieurs heures. Si la lumière avait la faculté d'ozoner l'air, comme on l'a avancé et répété plusieurs fois, l'air humide insolé soustrait depuis peu à l'action de cet agent devrait agir sur le papier sensible à la manière de l'ozone. Or cela n'a pas lieu ; quelque longue que soit la durée de l'insolation, on ne parvient pas à donner à l'air, même pour un laps de temps très-court, les propriétés caractéristiques de l'oxygène actif. C'est un point que l'on démontre encore de la manière la plus évidente en faisant passer, au moyen d'un aspirateur, un courant d'air humide dans un long tube en verre divisé en trois parties inégales. La première partie, celle par où l'air arrive, est éclairée directement par la lumière solaire, sa longueur est de $1^{m},50$; la seconde partie, longue de 15 centimètres environ, est recouverte de papier noir ; enfin la troisième partie, de même longueur que la précédente, reçoit, comme la première, la lumière directe du soleil. On met une bande de papier sensible dans la partie obscure du tube, on en place une toute semblable dans la partie éclairée qui vient à la suite ;

Digitized by Google

puis on fait passer lentement le courant gazeux, en choisissant un moment où le soleil est bien brillant ; le réactif placé dans l'obscurité ne change pas de couleur, même après vingt-quatre heures de contact avec l'air humide qui a subi l'influence de la lumière dans la première partie du tube. La seconde bande se colore constamment après quelques heures d'exposition : l'action de la lumière dans cette circonstance peut être comparée, jusqu'à un certain point, à l'action de la chaleur, dans le cas où cet agent détermine l'oxydation d'un métal, du fer par exemple, aux dépens de l'oxygène de l'air. Aussitôt que l'on cesse de chauffer, l'action s'arrête, et l'air refroidi, après avoir subi l'influence de la chaleur, n'agit pas plus sur le métal, que l'air humide insolé, soustrait à l'action de la lumière, n'agit sur le papier ioduré ; ce sont des phénomènes du même ordre, et tout à fait comparables.

Dans mes expériences relatives à l'action des éléments et des matières constituant l'atmosphère sur le réactif ioduré, exposé à la lumière ou dans l'obscurité, en présence ou en l'absence de la vapeur d'eau, j'ai été obligé, pour éviter toute cause d'erreur, d'opérer dans des espaces clos ; à cet effet, j'ai pris des tubes en verre blanc de 25 millimètres de diamètre, dans lesquels je plaçais d'abord une bande de papier sensible et que j'étirais ensuite à la lampe en leur donnant une longueur de 25 centimètres. Dans le cas où je voulais faire intervenir l'humidité ou un liquide volatil, le tube portait à la partie inférieure un petit réservoir cylindrique, séparé de la portion supérieure par un étranglement destiné à empêcher la bande de papier de tremper dans le liquide soumis à l'expérience. Je chassais l'air contenu dans le tube en faisant communiquer celui-ci par une de ses extrémités étirées avec un appareil produisant le gaz dont je voulais étudier l'action ; je maintenais le courant gazeux assez longtemps pour déplacer tout l'air, puis j'opérais la fermeture des pointes effilées en les chauffant au chalumeau.

Digitized by Google

Cet appareil peut servir pour faire les expériences dans le vide sec ou humide, à la lumière ou dans l'obscurité : il suffit pour ce dernier cas de le recouvrir d'une feuille de papier noir suffisamment épaisse ; je l'ai employé avec succès pour constater l'action des éléments de l'air, pris isolément ou deux à deux, sur le papier ioduro-amidonné.

Voici les résultats de mes observations à cet égard :

1°. Dans le vide sec, le papier ne se colore ni à la lumière ni dans l'obscurité.

Dans un espace clos ne contenant que de la vapeur d'eau, il n'y a pas non plus de coloration : le papier reste blanc comme dans le vide sec.

2°. L'oxygène sec est sans action sur le papier ; il n'y a pas de coloration, même sous l'influence de la plus vive lumière.

3°. L'oxygène humide, exposé à la lumière en présence du papier, le colore promptement ; dans l'obscurité, le réactif reste blanc, même après un laps de temps assez considérable.

4°. Le gaz azote pur, sec ou humide, est complétement inerte en présence du papier ioduré.

5°. Un mélange d'oxygène et d'azote se comporte absolument comme l'oxygène pur, sauf l'intensité de la coloration du papier, qui devient moindre à mesure que la quantité d'oxygène contenu dans le mélange diminue.

6°. L'acide carbonique est, comme le gaz azote, sans action sur le réactif ioduré.

7°. Le gaz ammoniac pur ou mélangé avec le gaz azote n'agit pas sur le papier sec ou humide, à la lumière ou dans l'obscurité.

8°. L'acide hypoazotique, ajouté en très-petite quantité à du gaz azote, colore immédiatement le papier, même dans l'obscurité et avec la vapeur sèche. Lorsque la proportion d'acide est tellement faible, que sa présence est à peine sensible à l'odorat, la coloration ne se développe bien que sous

Digitized by Google

l'influence de la lumière, surtout si la vapeur nitreuse mélangée au gaz azote est en présence de l'eau.

9°. L'hydrogène, le protoxyde et le bioxyde d'azote, l'oxyde de carbone sont inertes en présence du papier ioduré, dans une atmosphère sèche ou humide, à la lumière ou dans l'obscurité.

10°. Le charbon fortement calciné empêche la coloration du papier dans l'oxygène ou dans l'air humide, même sous l'influence de la plus vive lumière; le volume du gaz ne change pas: il ne paraît pas non plus se former d'acide carbonique; le charbon de bois ordinaire retarde la coloration, mais ne l'empêche pas complétement.

11°. Les essences de térébenthine, de citron, de menthe, de lavande, récemment distillées et conservées à l'abri de l'air, n'ont pas d'action sur le papier ioduré placé dans une atmosphère inerte de gaz azote ou d'acide carbonique; dans l'air ordinaire ou dans une atmosphère contenant de l'oxygène, ces essences produisent la coloration du réactif, même dans l'obscurité; les mêmes substances exposées préalablement à l'air colorent le papier aussitôt son contact, sans l'intervention de l'oxygène ambiant, car la coloration a lieu également dans une atmosphère inerte. Cette observation répond aux remarques que M. Bineau a faites au sujet de la communication de mon Mémoire à l'Académie des Sciences. Elle justifie complétement l'opinion que j'ai émise relativement à l'influence des arbres verts et des plantes aromatiques sur la coloration du papier ioduré exposé à l'air dans leur voisinage ; elle démontre évidemment que les essences n'ont pas exclusivement pour effet, comme semble le croire M. Bineau, de modifier l'oxygène avec lequel elles se trouvent en contact : elles agissent après avoir absorbé une portion du gaz ambiant; mais rien jusqu'ici ne prouve que la portion de l'oxygène non absorbée soit modifiée de manière à acquérir les propriétés actives du gaz produit par la pile. Le mode d'action des essences est donc entièrement différent

Digitized by Google

de celui que l'on admet pour le phosphore et ne peut en aucune façon lui être assimilé.

12°. L'huile essentielle d'amandes amères se comporte tout autrement que les essences précédentes ; elle ne colore pas le papier à la lumière, en présence de l'air ou de l'oxygène, bien qu'elle absorbe ce dernier gaz pour passer à l'état d'acide benzoïque hydraté. Le fait en lui-même n'a rien d'extraordinaire, je ne le cite que parce qu'il prouve, avec beaucoup d'autres faits du même genre, que les phénomènes d'oxydation lente qui se passent dans l'air ne sont pas nécessairement accompagnés d'une production d'ozone. Il indique en outre que, dans l'état actuel des choses, il serait à désirer que l'on soumît à un examen approfondi toutes les questions relatives au sujet que nous traitons ; car, tant que ces questions n'auront pas reçu de l'expérience une solution satisfaisante, il sera permis de conserver des doutes sur l'existence de l'oxygène actif dans l'atmosphère.

En résumé, il résulte des observations et des expériences rapportées dans ce Mémoire que le papier ioduro-amidonné ne peut pas être employé comme un réactif certain de l'oxygène ozoné ; il se colore en effet sous des influences nombreuses et variées, qu'il est souvent impossible d'apprécier et de démêler.

A l'air libre, il se colore par les vapeurs rutilantes ou l'acide azotique existant dans l'atmosphère aux environs des villes, comme dans les endroits les plus éloignés des centres industriels et des laboratoires de chimie.

Les huiles essentielles exhalées par les arbres verts et les plantes aromatiques agissent sur le papier de la même manière que l'acide azotique.

Enfin dans certains cas, la lumière peut donner à l'air humide la propriété de colorer le papier, comme les acides et les essences, sans que l'on puisse admettre qu'il y ait eu production d'ozone.

L'influence que l'on a attribuée à l'oxygène dégagé par

Digitized by Google

les parties vertes des plantes sur la coloration du papier est tout à fait nulle; le plus souvent, le changement de couleur est dû aux principes volatils que les végétaux fournissent continuellement à l'atmosphère environnante.

Les résultats de mes expérienees annulent d'une manière complète les assertions de M. Scoutetten. En analysant les circonstances principales des observations où ce chirurgien a cru voir de nouvelles sources de l'ozone et en les rapprochant de celles qui sont rapportées dans ce Mémoire, on ne tarde pas à trouver la cause toute simple de la coloration du papier; elle est évidemment indépendante de la présence des végétaux et n'est que *le résultat d'une action simultanée de l'air, de la vapeur d'eau et de la lumière* sur le réactif ioduré, action qui rentre dans celles que M. Chevreul a fait connaître dans ses recherches chimiques sur la teinture.

Au point de vue hygiénique, les observations sur la coloration du papier sensible, à l'air libre, pourront être utiles, qu'elle que soit d'ailleurs la cause de la coloration : on pourra continuer à faire des expériences pour voir le rapport existant, dans un même lieu, entre la fréquence de cette coloration et l'état sanitaire de la population; mais il faudra, en outre, tenir compte, autant que possible, de toutes les circonstances capables de modifier cet état. En dehors de ces conditions, les observations dites ozonométriques sont complétement inutiles; elles n'ont pas la moindre valeur.

Digitized by Google

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES ET THÉORIQUES

Sur les figures d'équilibre d'une masse liquide sans pesanteur (1)

(Troisième série);

PAR M. J. PLATEAU.

Théorie des modifications que subissent, sous l'influence des mouvements vibratoires, les veines liquides lancées par des orifices circulaires.

Dans l'analyse que j'ai donnée de la série précédente (tome XXX de ces *Annales*, année 1850, page 203), on a pu voir que j'ai déduit des propriétés de mes figures liquides l'explication théorique de la constitution des veines liquides lancées par des orifices circulaires et soustraites à toute influence perturbatrice; il me restait à étudier, également sous le point de vue théorique, les curieux phénomènes qui se produisent lorsque des mouvements vibratoires sont communiqués au vase d'où la veine s'échappe et au liquide qu'il contient; c'est ce que j'ai fait dans ma *troisième série*, et je suis arrivé de même à l'explication naturelle de tous les phénomènes dont il s'agit.

Savart, après avoir essayé d'établir, à l'aide d'une hypothèse ingénieuse, que l'écoulement lui-même peut exciter, dans le liquide du vase, des vibrations dirigées normalement au plan de l'orifice, a montré que de semblables vibrations auraient pour résultat la formation de renflements et d'étranglements dans la veine, parce que la portion de cette dernière qui sortirait pendant que s'effectue à l'orifice une vibration dirigée de dedans en dehors, éprouverait une compression qui en augmenterait l'épaisseur, tandis que la portion qui sortirait pendant que s'effectue une vibration opposée éprouverait, au contraire, une traction

---

(1) *Mémoires de l'Académie de Bruxelles*, tome XXX.

Digitized by Google

qui l'amincirait. Le lecteur a dû se convaincre, par l'analyse de la série précédente, que la formation des renflements et des étranglements de la veine est due à une tout autre cause, savoir : aux forces moléculaires naissant de l'instabilité de l'équilibre de figure; mais lorsque des mouvements vibratoires sont transmis de l'extérieur au vase et au liquide, et existent conséquemment en réalité dans ce liquide, ces mouvements doivent nécessairement tendre à exercer sur la veine les actions alternativement comprimantes et étirantes que Savart a conçues; et si ces mêmes mouvements sont d'une période convenable, leur action concourra évidemment avec celle des forces figuratrices (1).

Avant d'examiner la chose de plus près, je rappellerai ici les principales modifications que, d'après les observations de Savart, la veine reçoit sous l'influence des mouvements vibratoires. Dans les sept premiers des numéros qui suivent, il s'agit des veines verticalement descendantes.

1°. La partie continue se raccourcit.

2°. Chacune des masses qui s'isolent à l'extrémité inférieure de la partie continue, se trouve d'abord aplatie dans le sens vertical, et, par suite, son diamètre horizontal est plus grand que celui de la sphère qu'elle tend à constituer.

3°. Les masses étant ainsi abandonnées à elles-mêmes sous une forme aplatie, et tendant à prendre la forme sphérique, elles dépassent ensuite cette dernière par l'effet de l'inertie, et s'allongent dans le sens vertical, pour s'aplatir de nouveau, puis s'allonger encore, et ainsi de suite. Ces variations périodiques ayant lieu pendant le mouvement rapide de translation des masses, la figure apparente de la partie trouble de la veine présente une suite régulièrement

(1) On se rappelle que j'ai nommé *forces figuratrices*, les forces moléculaires qui donnent à une masse liquide une figure d'équilibre, et conséquemment celles qui opèrent graduellement dans la veine la transformation en sphères isolées.

Digitized by Google

disposée de maxima et de minima d'épaisseurs, les premiers correspondant aux lieux où passent les masses dans leurs instants de plus grand développement horizontal, et les seconds aux lieux où elles passent dans leurs instants de plus grande contraction horizontale; en d'autres termes, cette partie trouble se montre composée d'une suite régulière de ventres allongés et de nœuds occupant des positions fixes. La partie continue se termine vers le milieu de la longueur du premier ventre.

4°. L'ensemble de ces phénomènes se manifeste déjà lorsque la veine est abandonnée à elle-même dans les circonstances ordinaires, c'est-à-dire lorsqu'on n'excite point, à l'aide d'un instrument, de mouvements vibratoires dans le liquide. Cela provient, d'une part, de ce que le choc de la partie discontinue contre le liquide dans lequel elle tombe, fait naître des vibrations qui se transmettent au vase par l'intermédiaire de l'air et des supports, et, d'autre part, de ce que le vase reçoit aussi, par les supports, les petites vibrations dues aux bruits extérieurs et propagées dans le sol. Ce n'est qu'en soustrayant, par certains procédés, le vase à ces deux influences, que la veine prend l'aspect qui lui est propre.

5°. Mais tous les phénomènes énumérés dans les trois premiers numéros précédents deviennent beaucoup plus prononcés et plus réguliers, lorsque, à l'aide d'un instrument, on produit, dans le voisinage de l'appareil, un son à l'unisson de celui qui résulterait du choc de la partie discontinue de la veine contre une membrane tendue. Alors la partie continue se raccourcit considérablement; les ventres s'élargissent; etc.

6°. Ces mêmes modifications augmentent encore, et acquièrent une régularité parfaite, lorsque l'instrument sonore, au lieu d'être tenu à une certaine distance de l'appareil, est mis en contact avec les parois du vase, et qu'il rend un

Digitized by Google

son très-intense et bien exactement à l'unisson de celui qui est propre à la veine.

7°. La veine est aussi influencée par des sons différents de l'unisson, mais avec beaucoup moins d'intensité.

8°. Les veines lancées dans des directions autres que la verticale descendante, sont modifiées de la même manière par l'action des mouvements vibratoires, excepté dans le cas du numéro suivant.

9°. Lorsque la veine est lancée obliquement de bas en haut entre certaines limites d'inclinaison, et qu'elle n'est point sous l'influence du son d'un instrument, sa partie discontinue se montre éparpillée dans le plan vertical en une sorte de gerbe. Sous l'influence d'un certain son, la gerbe se résout en deux jets bien distincts, ayant chacun leurs ventres et leurs nœuds régulièrement formés; un autre son déterminé transforme la gerbe en un système de trois jets; enfin il y a un son qui réduit la veine entière à un seul jet présentant un système de ventres et de nœuds parfaitement régulier, et ce son est aussi celui qui produit le plus grand raccourcissement de la partie continue.

Passons actuellement à l'explication de ces phénomènes bizarres. Afin de renvoyer le moins possible le lecteur à l'analyse de la série précédente, je dirai de nouveau que je nomme *divisions* de la partie continue d'une veine liquide, les portions de celle-ci dont chacune fournit une masse isolée; chaque division est donc comprise, pendant son mouvement de translation, entre le milieu d'un étranglement et celui de l'étranglement suivant, et se compose ainsi d'un renflement entier et de deux demi-étranglements. Cela posé, puisque chaque division naissant près de l'orifice donne plus loin une masse isolée, si l'on expose au choc de ces masses une membrane tendue, de manière à obtenir un son, le nombre des impulsions par seconde contre cette membrane sera égal à celui des divisions qui passent, dans

Digitized by Google

le même temps, à l'orifice ; mais l'impulsion de chacune des masses fait naître une vibration double, par l'enfoncement et le relèvement subséquent de la membrane : donc le nombre de vibrations doubles correspondant au son produit sera de même égal à celui des divisions qui passent à l'orifice.

Maintenant, si, au lieu de recevoir la veine sur une membrane tendue, on la soumet à l'influence d'un instrument sonore, les vibrations de cet instrument, transmises au liquide du vase et agissant à l'orifice, tendront de leur côté, comme on l'a vu plus haut, a produire dans la veine des renflements et des étranglements, et, par suite, des divisions. Or il est aisé de voir que si le son de l'instrument est exactement à l'unisson de celui que rendrait le choc de la partie discontinue de la veine contre une membrane tendue, ces nouvelles divisions auront la même longueur que les précédentes, car chaque vibration double de l'instrument détermine la formation d'un renflement et d'un étranglement, dont l'ensemble équivaut à un renflement plus deux demi-étranglements, c'est-à-dire à une division.

Si donc, dans ce cas de l'unisson exact, l'une des divisions dues au son de l'instrument coïncide avec l'une des divisions dues aux forces figuratrices, il en sera de même de toutes les suivantes, et l'action de l'instrument concourra ainsi d'une manière absolue avec celle des forces figuratrices. Cette coïncidence ne peut avoir lieu en général dans le premier moment où l'action de l'instrument se fait sentir, mais elle s'établit bientôt d'elle-même. En effet, tant qu'elle n'existe pas, les deux actions se gênent mutuellement, et comme les divisions dues aux forces figuratrices sont, par la nature de la cause qui les produit, susceptibles de se déplacer sous des influences légères, elles reculent ou avancent, jusqu'à ce qu'elles viennent se superposer exactement à celles que fait naître le son de l'instrument. A partir de cet instant, les forces figuratrices et les vibrations agissant pleinement de concert, leurs effets s'ajoutent, en sorte que

Digitized by Google

les divisions qui naissent à l'orifice sous cette double influence sont plus développées, dès leur formation, qu'en l'absence de l'instrument sonore; chacune d'elles quitte donc l'orifice, ou plutôt la section contractée, dans une phase plus avancée de sa transformation en masse isolée; conséquemment cette transformation s'achève en un temps plus court, d'où il résulte que chaque masse se détache à une moindre distance de l'orifice, et qu'ainsi la partie continue est raccourcie.

Mais l'action des vibrations ne se borne point là : en effet, quand un renflement se produit, les molécules liquides vont en s'éloignant de l'axe de la veine pour former la saillie de ce renflement, et, quand un étranglement se produit, les molécules vont, au contraire, en se rapprochant de l'axe; ces molécules sont donc animées de vitesses transversales; mais la partie de ces vitesses qui est due aux vibrations ne peut s'anéantir dans chaque divison, au moment où cette division quitte la section contractée, et elle continue, comme vitesse acquise, à s'ajouter à celle qui résulte des forces figuratrices; or cet excès persistant de vitesse transversale doit nécessairement augmenter les dimensions transversales des masses qui s'isolent, de manière que chacune de celles-ci, au moment où elle se détache de l'extrémité de la partie continue, a, dans le sens perpendiculaire à l'axe de la veine, un diamètre plus grand que celui de la sphère qu'elle tend à constituer. De là les oscillations de forme des masses isolées, et, par suite, les ventres et les nœuds de la partie trouble. De plus, ce même excès de vitesse transversale active la transformation, et contribue ainsi au raccourcissement de la partie continue.

Il est clair que ces phénomènes doivent être le plus prononcés lorsque l'instrument sonore qui rend l'unisson, au lieu d'être tenu à distance, est mis en contact avec les parois du vase; car alors les vibrations, transmises d'une manière plus immédiate, prennent dans le liquide une plus grande

Digitized by Google

amplitude, et conséquemment agissent sur la veine avec plus d'énergie. En outre, ces vibrations intenses étant parfaitement isochrones, leur effet doit masquer complétement celui de toutes les petites causes perturbatrices, et imprimer aux phénomènes une régularité parfaite.

J'ai étudié, dans le Mémoire, le cas où l'instrument rend un son différent de l'unisson dont il s'est agi dans ce qui précède. Sans qu'il soit nécessaire de reproduire ici cette discussion, on comprend que de semblables sons peuvent exercer aussi une influence sur la veine, mais que cette influence doit être de beaucoup inférieure à celle de l'unisson.

Lorsque la veine est abandonnée à elle-même dans les circonstances ordinaires, c'est-à-dire lorsqu'elle n'est point sous l'influence du son d'un instrument, mais qu'elle tombe librement dans le vase qui la reçoit, le choc des masses isolées contre le liquide qui s'accumule dans ce vase, fait naître des vibrations parmi lesquelles doivent dominer celles qui correspondent à l'unisson ; la veine doit donc être affectée d'une manière analogue, mais avec moins d'énergie que par un instrument sonore rendant l'unisson ; seulement, à cause de l'irrégularité de ces vibrations auxquelles viennent s'ajouter les vibrations plus irrégulières encore provenant des bruits extérieurs, les phénomènes doivent avoir beaucoup moins de netteté.

Les faits rappelés plus haut dans les n°s 1 à 7 s'expliquent ainsi d'une manière simple, et comme les principes que je viens d'exposer sont absolument indépendants de la direction d'émission de la veine, ils expliquent de même les faits du n° 8.

Essayons enfin de montrer comment on peut rendre raison des phénomènes singuliers du n° 9. Occupons-nous d'abord de la gerbe. Supposons une veine lancée obliquement de bas en haut sous un angle convenable, et non soumise à l'action d'un instrument sonore. Si, dans cette veine, toutes les divisions, en atteignant l'une après l'autre l'ex-

Digitized by Google

trémité de la partie continue, s'isolaient identiquement de la même manière, et si, toutes les masses partaient de là avec la vitesse précisément correspondante au mouvement de translation du liquide en ce point, il est évident que ces masses décriraient toutes la même trajectoire, et dès lors la partie discontinue ne pourrait présenter d'éparpillement ou de gerbe; il y a donc, comme Savart le remarque, des irrégularités dans l'émission des masses isolées de l'extrémité de la partie continue. Ces irrégularités, du reste, doivent être fort petites, car la gerbe n'a pas une grande largeur; elles ne proviennent point des petits mouvements vibratoires irréguliers transmis par l'air et les supports, car, en employant les précautions indiquées par Savart pour soustraire la veine à l'influence de ces petits mouvements, je n'ai pu réussir à faire éprouver à la gerbe une diminution notable. On doit inférer de là que les petites irrégularités dont il s'agit affectent l'action même des forces figuratrices; on comprend, en effet, vu la nature du phénomène de la transformation, que des causes perturbatrices même légères doivent influer sur la parfaite identité de toutes les divisions qui naissent l'une après l'autre à la section contractée; j'ai donné dans les §§ 50 à 55 de ma *deuxième série*, un exemple d'une semblable altération dans l'égalité de longueur des divisions d'un cylindre liquide.

Cela posé, considérons en particulier dans notre veine oblique deux étranglements qui se suivent avec le renflement qu'ils comprennent entre eux. En vertu de la marche de la transformation, chacun de ces deux étranglements, d'abord très-faiblement indiqué lorsqu'il quitte la section contractée, s'approfondit ensuite graduellement pendant le trajet de la partie continue, en envoyant la moitié de son liquide dans le renflement; celui-ci reçoit donc, par son extrémité antérieure, du liquide qui y est chassé en sens contraire du mouvement de translation, et,

Digitized by Google

par son extrémité postérieure, du liquide qui y est chassé dans le sens même de ce mouvement, en sorte que sa vitesse de translation tend à être diminuée par le premier de ces afflux, et à être augmentée par le second. Or, si les deux étranglements différaient entre eux à leurs naissances respectives, si, par exemple, ils étaient inégaux en longueur, il est évident que les quantités de mouvement totales apportées ainsi en deux sens opposés dans le renflement par les deux afflux ci-dessous, présentent aussi en général quelque différence, et par conséquent ne se sont pas exactement compensés à l'instant où le renflement passe à l'état de masse isolée; parmi ces masses, les unes quittent donc la partie continue avec un petit excès de vitesse, et les autres avec un petit déficit de vitesse. De petites inégalités irrégulièrement distribuées entre les étranglements naissants successifs doivent donc avoir pour résultat d'établir aussi de petites inégalités irrégulièrement distribuées entre les vitesses des masses isolées successives; mais dès lors ces masses doivent nécessairement parcourir des paraboles d'inégale amplitude, et conséquemment s'éparpiller dans le plan vertical. Telle est l'explication bien probable de la génération de la gerbe; voyons comment on peut expliquer de même les changements singuliers que celle-ci éprouve sous l'influence de certains sons.

Le son qui raccourcira le plus la partie continue, sera encore évidemment celui dont les vibrations tendent à produire dans la veine des divisions égales en longueur à celles que font naître de leur côté les forces figuratrices, abstraction faite des petites inégalités dues aux causes perturbatrices dont j'ai parlé plus haut. Mais les vibrations de l'instrument étant parfaitement régulières et isochrones, elles empêcheront, si elles ont une intensité suffisante, l'effet de ces causes perturbatrices; en d'autres termes, en activant la transformation, elles y apporteront leur régularité, en sorte que tous les étranglements naissants seront identiques, et

Digitized by Google

qu'ainsi toutes es masses isolées suivront exactement la même trajectoire. Sous l'influence de ce son, la gerbe devra donc disparaître, et la totalité de la veine se réduira à un jet unique présentant un système bien régulier de ventre et de nœuds.

Savart n'indique point quels sont les rapports entre le son principal ci-dessus et les sons qui changent la gerbe en un système de deux ou de trois jets; mais j'ai cherché ces rapports par l'expérience, et j'ai trouvé, par exemple, que l'on obtient un système de deux jets sous l'influence de l'octave grave du son principal. Essayons de rendre raison du phénomène. La durée d'une vibration double correspondante à cette octave grave étant égale à deux fois celle d'une vibration double correspondante au son principal, chacune des divisions que tend à produire dans la veine le premier de ces deux sons a évidemment deux fois autant de longueur que chacune de celles qui résulteraient de l'action du second, et conséquemment, d'après ce qui précède, deux fois autant de longueur que chacune des divisions dues aux forces figuratrices. Cela étant, on admettra sans peine qu'au moment où l'action de l'octave grave se fait sentir, les divisions dues aux forces figuratrices avancent ou reculent un peu jusqu'à ce que chaque couple de ces divisions corresponde à chacune des portions de la veine qu'occuperaient respectivement les divisions dues au son de l'instrument. Alors, en effet, on voit aisément que les deux extrémités de chacun des couples dont il s'agit constituent à la fois les milieux des étranglements que tendent à déterminer les vibrations, et des milieux d'étranglements produits par les forces figuratrices, en sorte qu'à ces mêmes extrémités et aux environs il y a concours absolu entre les deux genres d'action.

Maintenant, examinons ce qui doit se passer, pendant la transformation en masses isolées, dans l'un quelconque des couples ci-dessus. Ce couple, se composant de deux divisions

Digitized by Google

entières, contient deux renflements qui comprennent entre eux un étranglement, et se termine par deux demi-étranglements; or, tandis que les étranglements entiers auxquels ces terminaisons appartiennent sont favorisés par les vibrations, il est clair que l'étranglement intermédiaire est, au contraire, en lutte avec les vibrations, puisque son milieu, qui est le milieu du couple, correspond au milieu de la division que les vibrations tendent à produire, et, par suite, au milieu du renflement de celle-ci; chacun des renflements que font naître dans la veine les forces figuratrices est donc adjacent à deux étranglements inégalement sollicités, et tous se trouvent ainsi dans la condition dont nous avons parlé plus haut à propos de la formation de la gerbe, c'est-à-dire que les quantités totales de mouvement qu'ils reçoivent par leurs deux extrémités de la part des étranglements, sont inégales. En outre, par suite de la disposition alternante des étranglements favorisés et des étranglements en lutte, cette différence des quantités de mouvement est alternativement dans un sens et dans l'autre, et conséquemment les masses isolées abandonnent la partie continue alternativement avec un petit excès et avec un petit déficit de vitesse. Mais ici les vibrations régularisent les phénomènes, tous les excès de vitesse sont identiques entre eux, de sorte que les masses qui les possèdent décrivent toutes une même trajectoire, et tous les déficits de vitesse sont aussi identiques entre eux, de sorte que les masses qui les ont subis décrivent toutes une autre même trajectoire; donc sous l'influence de l'octave grave du son principal, la gerbe doit être remplacée par deux jets séparés.

Quant au système de trois jets, l'expérience m'a montré qu'on l'obtient sous l'influence de la quinte grave du son précédent, ou, en d'autres termes, de la double quinte grave du son principal. On se l'expliquera sans difficulté en employant le mode de raisonnement qui précède, si l'on remarque que les vibrations de cette double quinte sont

Digitized by Google

trois fois moins rapides que celle du son principal, et qu'ainsi chacune des divisions qu'elles tendent par elles mêmes à déterminer dans la veine, comprend exactement trois des divisions dues aux forces figuratrices.

Enfin il y a d'autres sons qui produisent aussi des systèmes de deux et de trois jets ; on trouvera à cet égard tous les détails dans le Mémoire lui-même, auquel je renvoie également pour l'explication des faits de moindre importance dont je n'ai pu parler dans cette analyse.

NOTE POUR SERVIR A L'HISTOIRE DU COLCHIQUE D'AUTOMNE (*Colchicum autumnale*, L.);

PAR M. L. OBERLIN,

Professeur adjoint à l'Ecole supérieure de Pharmacie de Strasbourg.

En 1820, à la suite de l'examen chimique de plusieurs végétaux de la famille des Colchicacées, MM. Pelletier et Caventou (1) assimilèrent le principe trouvé dans le colchique d'automne à celui découvert par eux dans d'autres plantes de cette famille, en indiquant la présence de la vératrine dans cette plante.

En 1833, MM. Hess et Geiger (2) firent ressortir la différence du principe actif du colchique de celui que renferment l'ellébore blanc et la cévadille, en donnant les caractères physiques et chimiques de l'alcali qu'ils ont nommé *colchicine*.

La divergence des résultats obtenus par ces chimistes m'a engagé à reprendre l'étude de cette plante. Je me propose de faire connaître les résultats auxquels je suis arrivé en

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, tome XIV.

(2) *Handwœrterbuch der reinen und angesvandten Chemie von Liebig, Poggendorff und Wohler*, tome II, page 330.

Digitized by Google

étudiant un des principes les plus actifs du colchique, après avoir rappelé le mode de préparation et énuméré les caractères de la colchicine donnés par MM. Hess et Geiger. Ces chimistes préparent la colchicine, en épuisant à chaud, par l'alcool aiguisé d'acide sulfurique, les semences de colchique concassées. Après digestion, ils ajoutent de l'hydrate de chaux et éliminent le précipité par décantation. Le liquide obtenu, saturé par l'acide sulfurique, est soumis à la distillation, après avoir été filtré. Le résidu aqueux résultant de la concentration est mélangé avec un excès de carbonate de potasse; pour dépouiller de toute partie liquide le magma recueilli, on le comprime entre des feuilles de papier non collé. Après dessiccation, on extrait la colchicine par l'alcool absolu, et l'on traite cette solution alcoolique par le charbon animal. L'alcali est purifié par de nouvelles cristallisations ou transformé en sulfate, puis séparé de nouveau par l'hydrate de chaux.

D'après les auteurs, la colchicine cristallise de sa solution en prismes ou en aiguilles incolores; si le liquide alcoolique ou éthéré est trop concentré, elle se dépose sous forme de couche d'aspect résineux. D'après les mêmes auteurs, cet alcali est soluble dans l'eau, l'alcool et l'éther, d'une saveur très-amère et âcre; il est sans odeur, légèrement alcalin, inaltérable à l'air et fusible à une douce chaleur. Les propriétés de la colchicine, d'après MM. Hess et Geiger, sont: de colorer la solution d'iode en rouge brique kermetisé, de précipiter en jaune par le chlorure de platine, de former un précipité floconneux blanchâtre avec l'infusion de noix de galle. L'acide nitrique concentré la colore en bleu ou violet foncé, cette teinte passe peu à peu au vert olive et au jaune. L'acide sulfurique la colore en jaune brunâtre. Enfin, cet alcali forme avec les acides des sels amers et âcres qui se dissolvent facilement dans l'eau et dans l'alcool. Ces chimistes n'en donnent pas l'analyse élémentaire.

Tels sont le procédé de préparation et les propriétés de

Digitized by Google

l'alcaloïde appelé *colchicine* par MM. Hess et Geiger; mais bien que j'aie suivi avec soin le mode d'extraction indiqué, je ne suis point arrivé à un principe cristallisable, même en essayant de tous les dissolvants pour faciliter la cristallisation.

Le produit que j'ai obtenu est soluble dans l'eau, incristallisable; il attire l'humidité et se résout, sous l'influence des acides, en un principe cristallisable insoluble dans l'eau, et en une matière résineuse qui paraît encore être complexe. Voulant faire contrôler les diverses opérations qui me donnaient constamment le même produit, je priai M. le docteur Winckler, de Darmstadt, de me préparer quelques grammes de colchicine d'après le procédé Hess et Geiger. M. Kessler, fabricant de produits chimiques, voulut bien me rendre le même service. Le produit de ces deux sources est identique au mien, sauf une coloration jaunâtre un peu plus prononcée. La substance que j'ai reçue, comme celle que j'ai préparée moi-même, est incristallisable, très-hygrométrique, presque blanche quand elle a été traitée à plusieurs reprises par le charbon lavé, très-soluble dans l'eau et les autres dissolvants nommés, nullement alcaline, mais offrant les propriétés indiquées à l'égard de certains réactifs énumérés par MM. Hess et Geiger : seulement, je le répète, le produit est parfaitement incristallisable.

Voici maintenant le résultat de mes recherches sur ce produit incristallisable obtenu par le procédé Hess et Geiger.

La solution aqueuse de la colchicine acidifiée par l'acide sulfurique ou chlorhydrique, se colore en jaune intense; quand elle est ramenée en un certain état de concentration au bain-marie, elle précipite en blanc jaunâtre par l'eau; ce précipité, bien lavé et débarrassé de la matière colorante, est soluble dans l'alcool, dans l'éther, et cristallise facilement. On obtient plus de produit en faisant usage d'acide chlorhydrique et en laissant la réaction s'opérer spontanément. Après quelques semaines, on trouve un grand nombre de

Digitized by Google

mamelons à cristallisation aciculaire. Ces derniers, pulvérisés et bien lavés, donnent dès la première recristallisation un produit presque blanc, tandis que si l'on se sert d'acide sulfurique on n'obtient qu'à grande peine des cristaux blancs et nacrés; la matière résineuse et colorante qui accompagne ce produit s'éliminant difficilement.

Ce principe cristallin n'est pas un sel, il est neutre et les réactifs n'y indiquent aucune trace des acides employés dans sa préparation. Je le nomme *colchicéine*, car il diffère, comme on vient de le voir, de la colchicine de Hess et Geiger, qui, comme je l'ai montré, paraît être un produit complexe.

Les propriétés de la colchicéine sont : de cristalliser très-facilement en lamelles nacrées, d'être presque complétement insoluble dans l'eau, mais de communiquer à ce véhicule une légère amertume qui augmente sensiblement lorsqu'il est porté à l'ébullition. A ce degré, il se dissout une notable partie du produit qui se dépose aussitôt après refroidissement. Les dissolvants de la colchicéine sont : l'alcool, l'éther, l'alcool méthylique, le chloroforme, qui contractent en sa présence une amertume très-intense et persistante.

La dissolution alcoolique de colchicéine se colore par l'addition du bichlorure de platine, et il ne se forme pas de précipité. L'acide nitrique pur et concentré dissout la colchicéine, elle se colore en jaune très-intense, passe à une couleur violacée, puis au rouge foncé et au rouge clair, pour revenir à sa couleur jaune primitive.

L'acide sulfurique concentré en forme une solution d'un jaune très-intense qui se conserve même si elle est étendue d'eau; il s'y forme à la longue des flocons brunâtres. L'acide chlorhydrique la dissout avec couleur jaune clair. Enfin, l'acide acétique en opère également la dissolution, mais sans changement de couleur.

La colchicéine est soluble dans l'ammoniaque et cristallise par l'évaporation à l'air; elle est soluble dans la potasse

Digitized by Google

caustique, se colore en vert par le chlorure ferrique, et n'offre aucun changement de couleur ni trouble en présence des solutions d'acétate de plomb neutre ou triplombique, du nitrate d'argent, du chlorure mercurique, de l'infusion de noix de galle.

La colchicéine paraît pouvoir se combiner à la baryte, car si l'on réunit des solutions saturées d'hydrate de baryte et de colchicéine dans de l'alcool méthylique, il se forme bientôt un précipité volumineux, gélatiniforme, soluble dans l'esprit-de-bois et même dans un excès de la solution barytique.

La colchicéine est inaltérable à l'air; elle est sans action sur le papier de tournesol rouge ou bleu. Exposée dans un tube à la chaleur du bain d'huile, elle se ramollit d'abord et entre en fusion à 155 degrés; si on élève la température, elle se colore à environ 200 degrés. Chauffée sur une lame de platine, elle fond, prend une couleur jaunâtre, et brûle en ne laissant qu'une nuance de tache, sans action sur les papiers à réactifs mouillés. Chauffée avec de la potasse caustique, elle dégage un gaz qui ramène au bleu le papier de tournesol rougi. Calcinée avec le potassium, on obtient, en suivant le procédé de M. Lassaigne, un résidu qui, traité par une dissolution de sel ferroso-ferrique et ensuite par l'acide chlorhydrique, une liqueur bleue dont le dépôt est du bleu de Prusse.

La présence de l'azote m'étant démontrée par ces deux expériences, j'ai soumis la colchicéine à l'analyse élémentaire; voici les résultats :

Dosage du carbone et de l'hydrogène.

Première opération.

Poids de la substance.....	0,339
Eau.....	0,200
En centièmes H.....	6,56
Acide carbonique.....	0,7755
En centièmes C.....	62,390

Digitized by Google

Deuxième opération.

Poids de la substance.....	0,32
Eau...	0,189
En centièmes H.....	6,56

Troisième opération.

Poids de la substance.....	0,2775
Acide carbonique.....	0,6405
En centièmes C.....	62,9488

Dosage de l'azote. (Procédé de M. Dumas.)

Poids de la substance.....	$0^{gr},503$
Volume du gaz à 0° et $0^{m},760$ de pression barométr..	$17^{cc},144$
Poids de l'azote en centièmes.....	4,298

Ces nombres permettent d'établir la formule suivante pour la colchicéine, savoir :

$$C^{35}H^{22}AzO^{11}.$$

Cette formule s'accorde sensiblement avec les résultats de l'expérience.

	Calcul.		Expérience en moyenne.
C	62,83	C	62,669
H.....	6,60	H.....	6,560
Az.....	4,19	Az.....	4,298
O.....	26,38	O.....	26,473
	100,00		100,000

Préexistence de la colchicéine dans les semences du colchique.

Cette substance pouvant être le résultat de l'action des réactifs sur les matériaux normaux des semences de colchique, j'ai cherché à m'assurer de sa préexistence; je crois y être parvenu, en procédant de la manière suivante :

J'ai dissous de l'extrait alcoolique de semences de colchique, préalablement privé de l'huile, du glucose et de la matière amylacée, dans de l'alcool, et je l'ai décoloré par le charbon

Digitized by Google

bien lavé; après filtration, le charbon a été repris itérativement par de l'alcool bouillant et réuni à la première liqueur. L'extrait sirupeux qui reste après la distillation, dissous dans de l'eau et légèrement acidulé par de l'acide sulfurique très-étendu, détermine un précipité floconneux; ce liquide, filtré, laisse apparaître après quelques semaines les cristaux mamelonnés précédemment indiqués. Ces derniers cristallisent dans l'alcool et sont identiques avec la colchicéine.

L'action des acides sur des corps analogues ayant donné lieu à des dédoublements d'où résultent des principes particuliers et du glucose, j'ai cherché à m'assurer de la présence de ce dernier corps dans les eaux mères, d'où s'étaient déposés les cristaux de colchicéine, mais je n'ai pu réussir qu'à isoler une matière résineuse insoluble dans l'eau, combinée à de la matière colorante et très-soluble dans les alcalis : un produit, par conséquent, de la nature des acides.

Les caractères de cette matière résineuse sont : d'être soluble dans l'alcool et l'éther, de se colorer en rouge sang par l'acide nitrique, de se dissoudre dans l'ammoniaque en se colorant également en rouge intense.

Expériences physiologiques.

D'après les expériences faites par M. le professeur Schroff (1), de Vienne, la colchicine obtenue suivant le procédé de MM. Hess et Geiger détermine une action toxique sur les lapins à la dose déjà de $0^{gr},10$; l'animal ne succombe qu'après douze à dix-huit heures. Donnée à des doses plus élevées, même d'un gramme, elle n'a amené la mort qu'après sept à huit heures.

La colchicéine est-elle injectée dans l'estomac même à la dose de $0^{gr},50$, ne détermine pas la mort et n'occasionne que des accidents passagers.

(1) *Œsterreichische zeitschrift für praktische Heilkunde.* Vienne, journal du 6 juin 1856.

Digitized by Google

MÉMOIRES SUR LA CHIMIE PUBLIÉS A L'ÉTRANGER.

PAR M. ADOLPHE WURTZ.

Sur l'acide Méthionique; par M. A. Strecker (1).

L'acide méthionique, que M. Liebig a obtenu en faisant réagir l'acide sulfurique anhydre sur l'éther, peut être préparé avantageusement de la manière suivante : On renverse un ballon renfermant de l'acide sulfurique anhydre dans une éprouvette contenant un peu d'éther; les deux corps réagissent lentement l'un sur l'autre par le mélange de leur vapeur. Lorsque tout l'acide sulfurique a disparu, on ajoute de l'eau au produit formé. Il se forme ainsi deux couches, une couche aqueuse, et une couche éthérée supérieure, celle-ci renferme de l'éther sulfatique. En faisant bouillir la couche aqueuse et en la neutralisant par du carbonate de baryte, on obtient par l'évaporation du méthionate de baryte cristallisé en lamelles minces et brillantes. La couche éthérée soumise à un traitement analogue, fournit également du méthionate de baryte.

Ce sel cristallise en tables rhomboïdales présentant l'éclat irisé des lames minces. Fondu avec l'hydrate de potasse, il donne un résidu de sulfite et de sulfate de potasse, presque à équivalents égaux. Il renferme 2 BaO, $C^2H^2S^4O^{10} + 4$ HO. A 140 degrés, il perd 4 équivalents d'eau. Le méthionate de plomb qui cristallise en grands prismes rhomboïdaux probablement isomorphes aux cristaux de sel du barytique renferme 2 PbO, $C^2H^2S^4O^{10} + 4$ HO. Lorsqu'on fait bouillir la solution de ce sel avec de l'hydrate d'oxyde de plomb, il se

(1) *Annalen der Chemie und Pharmacie*, tome C, page 199 (nouvelle série, tome XXIV), novembre 1856.

Digitized by Google

forme un sel basique moins soluble dans l'eau que le sel précédent et qui se sépare en cristaux incolores. Il renferme à l'état sec $2PbO, C^2H^2S^4O^{10}$, sa solution est alcaline et attire l'acide carbonique de l'air.

Le méthionate de cuivre, préparé par double décomposition avec le sel de baryte et le sulfate de cuivre, cristallise en prismes rhomboïdaux bleus, solubles dans l'eau et dans l'alcool faible. Il renferme $2CuO', C^2H^2S^4O^{10} + 10HO$.

Le méthionate d'argent $2AgO, C^2H^2S^4O^{10}$ cristallise en lamelles incolores qui noircissent à la lumière. L'alcool précipite ce sel de sa solution aqueuse.

L'acide méthionique séparé par l'hydrogène sulfuré du méthionate de plomb, et évaporé dans le vide, se présente sous la forme d'un liquide sirupeux, qui finit par cristalliser en aiguilles. Ces cristaux sont très-acides et très-déliquescents.

L'acide méthionique est très-stable, il supporte sans se décomposer une chaleur très-forte, et ne s'altère pas par l'ébullition avec de l'acide nitrique faible; sa constitution peut être exprimée par la formule

$$C^2H^2\left\{\begin{matrix}S^4O^8\\H^2\end{matrix}\right\}O^4,$$

d'après laquelle il renferme de l'acide sulfureux $2(S^2O^4)$ conjugué avec le radical biatomique C^2H^2. Je me suis assuré par l'expérience, que l'acide méthionique est identique avec l'acide méthylotétrasulfurique (disulfométholique) récemment décrit par M. Buckton et Hofmann (page 497).

Sur la Sulfobenzide; par M. Gericke (1).

La sulfobenzide, préparée par l'action de l'acide sulfurique anhydre sur la benzine, cristallise en petites tables

(1) *Annalen der Chemie und Pharmacie*, tome C, page 207 (nouvelle série, tome XXIV), novembre 1856.

Digitized by Google

rhomboïdales, d'un éclat soyeux, fortement réfringentes, fusibles à 115 degrés.

L'acide sulfurique concentré la dissout à chaud en la transformant en acide sulfophénylique

$$\underbrace{C^{24}H^{10}S^2O^4}_{\text{Sulfobenzide.}} + S^2H^2O^8 = 2\underbrace{C^{12}H^6S^2O^6}_{\text{Ac. sulfophénylique.}}.$$

Lorsqu'on la chauffe avec l'acide nitrique fumant et qu'on ajoute de l'eau à la solution, il s'en précipite une substance amorphe peu soluble dans l'eau bouillante, soluble dans l'alcool et qui représente la *nitrosulfobenzide* $C^{24}H^9(AzO^4)S^2O^4$. Le sulfhydrate d'ammoniaque transforme cette substance en une base nouvelle l'*amidosulfobenzide* $C^{24}H^9(AzH^2)S^2O^4$; ce corps apparaît sous le microscope en petits prismes quadrilatères. Il est peu soluble dans l'eau froide et se dissout facilement dans l'eau chaude et dans l'alcool. Il forme avec l'acide chlorhydrique une combinaison cristallisable en prismes quadrilatères rougeâtres.

Traitée par un mélange d'acide nitrique fumant et d'acide sulfurique, la sulfobenzide se transforme en *dinitrosulfobenzide* $C^{24}H^8(2AzO^4)S^2O^4$. Cette substance cristallise en petites tables rhomboïdales. Elle fond à 164 degrés et se sublime à 320 degrés sans altération. Elle est insoluble dans l'eau et se dissout fort peu dans l'alcool et dans l'éther.

Sous l'influence réductrice du sulfhydrate d'ammoniaque la dinitrosulfobenzide se transforme en *diamidosulfobenzide* $C^{24}H^8(AzH^2)^2S^2O^4$. Cette base cristallise en petits prismes quadrilatères qui fondent facilement en une masse brune.

Elle se dissout facilement à chaud dans l'eau et dans l'alcool.

Le chlorhydrate de diamidosulfobenzide

$$C^{24}H^8(AzH^2)^2S^2O^4, 2HCl$$

cristallise en prismes rhomboïdaux rougeâtres.

Digitized by Google

Le chlore réagit à froid sur la sulfobenzide. Cette réaction, favorisée par l'insolation ou par l'action de la chaleur, donne naissance à une huile jaune qui renferme

$$C^{24} H^8 Cl^2 S^2 O^4, 2 HCl.$$

C'est du chlorhydrate de dichlorosulfobenzide. Ce composé, soluble dans l'alcool et dans l'éther, insoluble dans l'eau, distille sans altération à 150 degrés environ. Les alcalis et les acides étendus ne l'altèrent pas. Par l'action brusque de la chaleur ou sous l'influence de la potasse alcoolique, il perd les éléments de l'acide chlorhydrique et se transforme en *dichlorosulfobenzide* $C^{24} H^8 Cl^2 S^2 O^4$, substance cristallisable en prismes longs et fins, fusible à 152 degrés et se sublimant en partie avant de fondre. Lorsqu'on fond ces cristaux à plusieurs reprises et qu'on les laisse refroidir, le point de fusion finit par s'abaisser à 64 degrés.

Les faits qui ont été exposés dans ce Mémoire sont de nature à prouver que le véritable équivalent de la sulfobenzide est exprimé par la formule

$$C^{24} H^{10} S^2 O^4,$$

proposée par Gerhardt et double de celle que l'on admet ordinairement d'après M. Mitscherlich.

La sulfonaphtaline est l'analogue de la sulfobenzide.

Il est probable que sa formule doit être doublée. Elle serait, d'après cela :

$$\left\{ \begin{matrix} C^{20} H^7 SO^2 \\ C^{20} H^7 SO^2 \end{matrix} \right\}.$$

C'est une substance cristalline, fusible entre 90 et 95 degrés.

Digitized by Google

Sur les formules de quelques amides et de quelques urées ; par M. Weltzien (1).

On peut représenter la constitution de l'urée par la formule

$$Az\left\{\begin{matrix} C^2 H^2 Az O^2 \\ H \\ H \end{matrix}\right\},$$

dans laquelle le groupe $C^2 H^2 Az O^2$, qu'on peut nommer *uret*, remplace 1 équivalent d'hydrogène. Le biuret prend naissance par la substitution d'un autre équivalent d'hydrogène par 1 équivalent d'uret. Sa constitution serait exprimée d'après cela par la formule

$$Az\left\{\begin{matrix} C^2 H^2 Az O^2 \\ C^2 H^2 Az O^2 \\ H \end{matrix}\right\} = \text{biuret.}$$

La créatine peut être envisagée comme du biuret dans lequel le dernier équivalent d'hydrogène serait remplacé par de l'éthyle, comme le fait voir la formule

$$Az\left\{\begin{matrix} C^2 H^2 Az O^2 \\ C^2 H^2 Az O^2 \\ C^4 H^5 \end{matrix}\right\} = \text{créatine.}$$

Enfin la créatinine renferme les éléments de l'urée dans laquelle 1 équivalent d'hydrogène serait remplacé par du cyanogène et l'autre par de l'éthyle, selon la formule

$$Az\left\{\begin{matrix} C^2 H^2 Az O^2 \\ C^2 Az \\ C^4 H^5 \end{matrix}\right\}.$$

J'ai essayé de préparer artificiellement la créatine en éthylant le biuret. Cette tentative est demeurée infructueuse.

La créatine pourrait se former aussi par la distillation

(1) *Annalen der Chemie und Pharmacie*, tome C, page 191 (nouvelle série, tome XXIV), novembre 1856.

Digitized by Google

sèche de l'éthylurée d'après l'équation

$$2\,Az\left\{\begin{matrix}C^2H^2AzO^2\\C^4H^5\\H\end{matrix}\right\} = Az\left\{\begin{matrix}C^2H^2AzO^2\\C^2H^2AzO^2\\C^4H^5\end{matrix}\right\} + Az\left\{\begin{matrix}C^4H^5\\H\\H\end{matrix}\right\}.$$

Éthylurée. Créatine. Éthyliaque.

Les expériences que j'ai faites dans cette direction n'ont pas donné de résultat décisif, quoique j'aie constaté avec certitude la formation de l'éthyliaque dans la décomposition de l'éthylurée par la chaleur. J'ai obtenu en outre un sublimé cristallin, qui paraît être de l'éther cyanurique $C^6Az^3O^3$, $3C^4H^5O$. Du moins il a donné à l'analyse des résultats voisins de ceux qu'exige cette formule (1). Si la formule de la créatinine, que nous avons donnée plus haut était exacte, on devrait obtenir ce corps par l'action du chlorure de cyanogène sur l'éthylurée :

$$Az\left\{\begin{matrix}C^2H^2AzO^2\\C^4H^5\\H\end{matrix}\right\} + C^2AzCl = Az\left\{\begin{matrix}C^2H^2AzO^2\\C^4H^5\\C^2Az\end{matrix}\right\} + HCl.$$

Éthylurée. Chlorure de cyanogène. Créatinine.

D'après ce qui précède, on pourrait définir une urée, une molécule ammoniacale dans laquelle 1 équivalent d'hydrogène est remplacé par 1 équivalent d'uret $C^2H^2AzO^2$.

---

(1) Je puis confirmer pour mon compte les observations de M. Weltzien. J'ai constaté depuis longtemps la formation d'une *petite quantité* d'éthyliaque dans la décomposition de l'éthylurée. Il se forme aussi un ou plusieurs acides cyanuriques. Seulement le produit principal n'est pas le corps $C^6Az^3O^3$, $3C^4H^5O$, que j'ai décrit dans mon Mémoire sur les éthers cyaniques et cyanuriques (*Annales de Chimie et de Physique*, t. XLII, p. 43). C'est une substance assez soluble dans l'eau et qui se dépose de cette solution en magnifiques rhomboèdres, d'une régularité et d'un éclat remarquables. Cet éther cyanurique renferme $C^6\left\{\begin{matrix}C^4H^5\\C^4H^5\\H\end{matrix}\right\}Az^3O^6$ et se forme en vertu de la réaction suivante :

$$3\,(C^6H^4Az^3O^3) = C^{14}H^{11}Az^3O^6 + 2\,AzH^3 + C^4H^7Az.$$

Ethylurée. Ether cyanurique. Ethyliaque.

(A. W.)

Digitized by Google

MÉMOIRES SUR LA PHYSIQUE PUBLIÉS A L'ÉTRANGER.

EXTRAITS PAR M. VERDET.

Mémoire sur la mesure des longueurs d'ondulation au delà du violet; par M. Esselbach (1).

M. Esselbach s'est servi pour étudier les rayons ultra-violets des procédés qui ont permis à M. Helmholtz de leur donner une intensité telle, qu'ils fussent directement perceptibles par la rétine. Ces procédés ont été décrits dans ces *Annales* (t. XLIV, p. 70 et suiv.), en rendant compte de M. Helmholtz, et nous nous bornerons à rappeler qu'ils exigent l'emploi de deux prismes de quartz et d'une lunette astronomique dont l'objectif et l'oculaire sont pareillement des lentilles de quartz, taillées de façon que leur axe de figure coïncide avec l'axe de cristallisation. La portion ultra-violette du spectre et les raies qu'elle renferme étant rendues bien visibles par ces appareils, si l'on place au devant de l'œil une mince plaque transparente, de façon qu'elle recouvre seulement la moitié de l'ouverture de la pupille, on aperçoit dans le spectre une série de bandes qui ont été vues pour la première fois par M. Talbot dans le spectre visible ordinaire, et que M. Airy a expliquées par l'interférence des rayons qui, ayant traversé la plaque transparente, viennent se réunir sur la rétine avec d'autres rayons de même couleur qui n'ont traversé que l'air. Si le bord rectiligne de la plaque transparente est parallèle aux raies de Fraunhofer, les bandes de Talbot sont également parallèles aux raies de Fraunhofer, et entre deux points du spectre correspondant à des longueurs d'ondulation λ et λ_1, il y a un nombre m de bandes qui est donné par

(1) *Poggendörff's Annalen*, tome XCVIII, page 513, août 1856. Un extrait de ce Mémoire a été communiqué à l'Académie des Sciences de Berlin dans la séance du 6 décembre 1855 et inséré dans ses *Comptes rendus* mensuels.

Digitized by Google

la formule suivante :

$$m = a\left(\frac{n_1 - 1}{\lambda_1} - \frac{n - 1}{\lambda}\right)$$

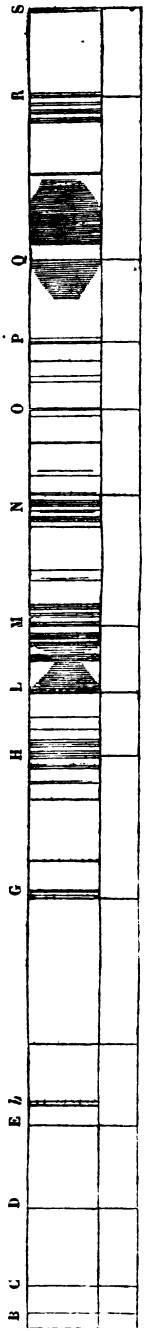
où a est l'épaisseur de la plaque, n l'indice de réfraction de cette plaque par la lumière dont la longueur d'onde est λ et n_1 son indice de réfraction par la lumière dont la longueur d'onde est λ_1. Il suit de là que si λ, n, n_1 et a sont connus, il suffira de déterminer m pour calculer λ_1 (1).

Pour appliquer cette méthode, M. Esselbach a pris pour plaque transparente une plaque de quartz d'épaisseur égale à $0^{mm},195$ inclinée de 33 degrés sur son axe, et il a compté les nombres de bandes qui existaient entre deux raies principales consécutives du spectre, depuis la raie B de Fraunhofer jusqu'à la raie R de Helmholtz, et ensuite il a mesuré les indices de réfraction de ces diverses raies dans le quartz. Le tableau suivant contient les résultats de ses recherches.

NOM des raies.	INDICE ORDINAIRE de réfraction dans le quartz d'après		VALEURS DE m.			LONGUEURS d'ondulation d'après	
	Esselbach.	Rüdberg.				Esselbach.	Fraunhofer.
B.....	1,5414	1,5409	7,5	7,0	"	0,0006874	0,0006878
C.....	1,5424	1,5418	20,0	19,0	19,5	"	0,0006564
D.....	1,5446	1,5442	22,5	22,0	23,5	0,0005886	0,0005888
E.....	1,5476	1,5471	18,5	18,5	"	0,0005260	0,0005260
F.....	1,5500	1,5496	31,0	31,0	31,0	0,0004845	0,0004843
G.....	1,5546	1,5542	14,5	25,0	25,0	0,0004287	0,0004291
H.....	1,5586	1,5582	11,0	11,0	"	"	0,0003929
L.....	1,5605	"	11,5	11,5	"	0,0003791	"
M.....	1,5621	"	14,5	15,5	15,0	0,0003657	"
N.....	1,5646	"	14,5	14,5	"	0,0003498	"
O.....	1,5674	"	8,0	7,5	8,0	0,0003360	"
P.....	1,5690	"	7,0	7,0	"	0,0003290	"
Q.....	1,5702	"	18,0	"	"	0,0003232	"
R.....	1,5737	"				0,0003091	"

(1) *Voyez* pour l'explication des bandes de Talbot le Mémoire de M. Airy inséré dans les *Transactions philosophiques* pour 1840.

Digitized by Google



Il a été nécessaire dans les calculs de supposer connues deux longueurs d'ondulation, l'une pour servir de point de départ et l'autre pour servir à calculer l'épaisseur de la plaque indépendamment de toute mesure micrométrique. On a choisi à cet effet les longueurs données par Fraunhofer pour les raies C et H. Les raies L, M, N, O, P du tableau précédent sont les lignes ainsi nommées par M. Stokes dans son Mémoire sur le changement de réfrangibilité de la lumière. Q et R ont été nommées par M. Esselbach, et afin de les définir complétement, nous reproduisons ici la figure qu'il a donnée de son spectre.

On voit que les résultats obtenus par M. Eisenlohr (1) se rapportent seulement aux rayons les plus réfrangibles transmis par le flint et le crown. Le spectre réel s'étend bien au delà.

Sur les actions diamagnétiques; par M. Reich (2).

On sait que M. Edmond Becquerel et M. Tyndall ont démontré que la répulsion exercée par un électro-aimant ou un aimant sur les corps diamagnétiques varie proportionnellement au carré de l'intensité du magnétisme, et que cette loi est un des principaux arguments qu'on a fait valoir en faveur de l'hypothèse du développement d'une polarité spéciale dans les corps diamagnétiques. M. Reich a obtenu une nouvelle confirmation de ces résultats avec la grande

(1) Voyez le cahier précédent de ces *Annales*.

(2) *Poggendorff's Annalen*, tome XCVII, page 283, février 1856.

Digitized by Google

balance de torsion qui lui avait servi à mesurer la densité moyenne de la terre. Il a suspendu à l'extrémité du levier horizontal de cette balance une boule de bismuth, et il en a approché tantôt un barreau aimanté, tantôt un électro-aimant. L'intensité des barreaux aimantés était mesurée par l'action qu'ils exerçaient sur une petite aiguille placée à une grande distance; l'intensité de l'électro-aimant était regardée comme proportionnelle à celle du courant voltaïque, et l'intensité de la répulsion était mesurée par le déplacement du bras de levier de la balance. Les répulsions observées ont varié à peu près comme le carré de l'intensité du magnétisme, mais sans suivre exactement cette loi. M. Reich pense que la différence peut s'expliquer par la variation de distance entre la boule de bismuth et l'aimant qui résulte du mouvement même de la balance.

Note sur la décomposition polaire de l'eau effectuée par l'électricité ordinaire et l'électricité atmosphérique; par M. Andrews (1).

Lorsqu'on fait passer une décharge d'électricité ordinaire à travers l'eau ou tout autre électrolyte, il se produit une décomposition polaire qui peut se manifester de bien des manières, particulièrement par la polarisation des électrodes, mais la quantité décomposée est toujours minime, et il est impossible de reconnaître la nature et de mesurer la proportion des éléments séparés. En faisant usage d'électrodes à la Wollaston, on obtient, dans le cas de l'eau, un dégagement de gaz assez abondant, mais ce dégagement est le résultat d'une action entièrement distincte des décompositions électrochimiques ordinaires; l'oxygène et l'hydrogène se produisent également sur les deux électrodes. Avec des électrodes ordinaires, il est impossible d'obtenir

---

(1) XXVth *Report of the British Association for the advancement of Science.*

Digitized by Google

aucune trace de gaz, même en prolongeant très-longtemps l'expérience, à moins qu'on n'ait à sa disposition une de ces puissantes machines d'Armstrong qui fournissent en un temps donné une quantité d'électricité incomparablement plus forte que les machines ordinaires.

Un artifice très-simple a permis à M. Andrews de recueillir et de mesurer des quantités de gaz sensibles, sans faire usage d'une autre source électrique qu'une machine ordinaire. Dans les conditions habituelles des expériences, les électrodes étant plongées au sein d'une masse d'eau assez considérable, les gaz qui se produisent en quantité très-faible se dissolvent entièrement et aucune bulle sensible ne se dégage. Il est donc nécessaire de soustraire les gaz autant que possible à cette action dissolvante. A cet effet M. Andrews emploie pour recueillir les gaz des tubes capillaires fermés par en haut, dans lesquels pénètrent par l'extrémité fermée de minces fils de platine. Par suite de cette disposition, quelles que soient d'ailleurs les dimensions du voltamètre, les gaz ne se trouvent plus en présence que de la très-petite quantité d'eau qui est renfermée dans les tubes capillaires; cette quantité se sature promptement et les gaz ne tardent pas à se dégager. Si les tubes sont gradués, on peut en mesurer les proportions relatives et reconnaître que les volumes des deux gaz sont dans le rapport de 1 à 2. L'un des gaz se transforme facilement en ozone par le passage de l'étincelle électrique et n'est par conséquent que de l'oxygène; l'autre donne à l'étincelle électrique qui le traverse la couleur rouge qui est caractéristique de l'hydrogène.

Une machine électrique à plateau (les dimensions n'en sont pas indiquées), faisant deux cent quarante révolutions par minute, a dégagé pendant ce temps environ 66 millièmes de millimètre cube d'oxygène.

A l'aide d'un cerf-volant électrique, M. Andrews a ré-

Digitized by Google

pété la même expérience avec l'électricité atmosphérique Il a obtenu en une heure, par un temps serein et nullement orageux, 54 millièmes de millimètre cube d'oxygène.

Note sur la stratification de la lumière électrique; par M. Van der Willigen (1).

Le phénomène de la stratification de la lumière électrique est aujourd'hui bien connu des physiciens et s'obtient, comme on sait, lorsqu'on fait passer l'étincelle de l'appareil inducteur de Ruhmkorff entre deux boules métalliques placées dans un récipient qui ne contient que de la vapeur très-raréfiée d'alcool, d'éther ou de certaines huiles essentielles. M. Van der Willigen a reproduit cette expérience avec l'électricité ordinaire de la manière suivante.

L'armature interne d'une bouteille de Leyde communique d'une part avec le conducteur d'une machine électrique, d'autre part avec la boule supérieure d'un œuf électrique qui contient seulement de la vapeur d'essence de bergamote sous la pression de 3 millimètres. L'armature externe communique d'une part avec le sol et d'autre part avec la boule inférieure de l'œuf électrique. Si toutes les communications sont métalliques, on n'obtient en faisant tourner la machine que des étincelles dépourvues de stratification; mais si la communication de l'une des armatures de la bouteille avec l'une des boules de l'œuf a lieu par l'intermédiaire d'une corde mouillée, de manière que la décharge ne puisse avoir lieu que très-lentement, la stratification se montre aussi bien qu'avec l'appareil inducteur de Ruhmkorff. M. Van der Willigen fait remarquer qu'il

(1) *Poggendorff's Annalen*, tome XCVII, page 494, juillet 1856.

Digitized by Google

est probable que dans cet appareil la décharge a une durée sensible par suite de la grande longueur du fil induit et de l'inertie magnétique du fer doux.

L'œuf électrique peut être remplacé par le vide barométrique. La vapeur de mercure y remplace la vapeur d'huile essentielle ou d'alcool qu'on emploie dans l'œuf électrique.

M. Van der Willigen pense que la stratification de la lumière électrique est due à ce que toute décharge en apparence continue est en réalité une succession de décharges partielles dont chacune donne lieu à une bande lumineuse séparée de la bande suivante par un intervalle obscur.

Digitized by Google

Observations météorologiques faites à l'Observatoire impérial de Paris. — FÉVRIER 1857.

JOURS DU MOIS.	9 HEURES DU MAT. Temps vrai. Barom. à 0°.	Ther-mom. extér. fixe et corr.	HYGROMÈTRE.	MIDI. Temps vrai. Barom. à 0°.	Ther mom. extér. fixe et corr.	HYGROMÈTRE.	3 HEURES DU SOIR. Temps vrai. Barom. à 0°.	Ther-mom. extér. fixe et corr.	HYGROMÈTRE.	6 HEURES DU SOIR. Temps vrai. Barom. à 0°.	Ther-mom. extér. fixe et corr.	HYGROMÈTRE.	9 HEURES DU SOIR. Temps vrai. Barom. à 0°.	Ther-mom. extér. fixe et corr.	HYGROMÈTRE.	MINUIT. Temps vrai. Barom. à 0°.	Ther-mom. extér. fixe et corr.	HYGROMÈTRE.	THERMOM. Maxi-ma.	Mini-ma.	ÉTAT DU CIEL A MIDI.	VENTS A MIDI.
1	755,09	—0,8	92	755,48	+ 0,3	80	755,24	+ 1,0	80	755,37	+ 0,6	86	755,16	+ 0,4	90	754,08	0,0	90	+ 1,9	—1,7	Couvert.....	S.S.E. faib
2	751,04	—0,2	92	749,65	+ 0,8	81	747,75	+ 0,9	75	748,77	— 0,4	81	746,17	— 1,2	85	745,36	—1,6	87	+ 1,2	—0,7	Couvert.....	S.E. tr.-fa.
3	746,59	—3,0	80	747,42	— 1,1	72	748,41	— 0,7	76	750,24	— 0,8	79	753,09	— 4,0	87	753,95	—5,2	97	— 0,7	—3,9	Couvert..	E. faible.
4	758,31	—5,6	83	759,25	— 2,6	77	759,56	— 2,1	77	761,21	— 3,0	78	762,17	— 2,9	77	762,43	—2,8	75	— 2,2	—5,6	Beau ; vapeurs.....	N. fort.
5	762,56	—3,9	79	762,07	— 1,5	74	761,13	— 0,8	72	761,38	— 2,9	83	760,98	— 4,6	89	760,55	—6,5	92	— 0,7	—3,9	Beau ; vap. abondantes.	N. ass. fort
6	759,44	—2,3	84	759,19	+ 1,0	78	758,45	+ 1,8	81	758,63	+ 1,2	88	758,60	+ 0,6	92	757,86	+0,5	94	+ 2,2	—6,6	Couvert ; air brumeux	E.S.E. faib.
7	756,90	+1,0	90	755,95	+ 3,9	71	754,77	+ 4,4	67	754,84	+ 1,6	70	754,18	— 0,8	81	753,98	—2,2	89	+ 4,5	—1,2	Beau ; vapeurs.....	S.E. tr.-faib
8	754,13	—1,7	91	753,78	+ 2,4	78	753,18	+ 4,4	75	753,30	+ 2,2	81	753,41	0,0	86	753,36	—0,8	90	+ 4,6	—2,8	Beau.	S.S.E. faib.
9	752,16	+1,7	87	751,37	+ 7,8	69	750,00	+ 9,1	61	750,16	+ 6,2	68	749,80	+ 4,7	76	751,21	+4,4	79	+ 9,6	—2,6	Beau ; cirrus.....	S. faible.
10	754,05	+5,2	83	754,27	+ 7,3	84	753,49	+ 6,7	91	753,57	+ 6,7	90	754,49	+ 6,1	87	755,08	+6,2	90	+ 7,4	+5,3	Couvert.....	S. faible.
11	757,95	+6,2	96	758,34	+ 8,1	85	758,01	+ 8,2	88	759,71	+ 6,0	92	760,64	+ 2,9	95	761,78	+1,8	95	+ 8,4	+5,7	Couvert...	N.O. tr.-fa.
12	764,93	+4,9	97	764,96	+ 6,9	65	765,76	+ 7,8	57	766,90	+ 6,0	64	767,66	+ 3,9	79	767,91	+0,6	90	+ 8,0	+4,6	Beau ; vapeurs..... ...	N.N.O tr.-fa
13	767,11	+1,2	96	766,96	+ 5,6	76	765,84	+ 6,8	66	765,43	+ 5,6	81	765,97	+ 0,4	91	765,94	—1,1	94	+ 7,0	+0,1	Beau ; vapeurs.....	N N.O. t -fa
14	765,48	+1,9	88	764,68	+ 3,7	88	762,46	+ 5,2	75	761,80	+ 3,6	84	761,23	+ 1,7	90	760,91	+0,8	94	+ 5,6	—1,7	Beau ; nuages..... ...	E.N.E. faib
15	760,45	+0,5	92	760,35	+ 5,8	82	760,02	+ 9,6	76	760,86	+ 7,9	84	761,66	+ 4,7	91	761,91	+2,4	98	+ 9,9	+0,1	Beau...	S.S.E. faib
16	762,02	+3,1	87	761,17	+ 8,4	71	760,58	+10,3	66	760,89	+ 7,5	78	760,97	+ 4,9	86	760,90	+2,6	90	+11,3	+1,2	Nuageux.....	S.S.O. faib
17	760,05	+3,5	87	759,57	+ 8,6	82	758,36	+10,5	73	758,48	+ 8,4	79	758,94	+ 5,6	86	759,11	+5,1	88	+10,7	+1,9	Beau ; vapeurs.....	S.E. faible.
18	*760,99	+5,7	90	760,77	+11,2	75	759,39	+11,6	74	759,48	+ 8,8	84	760,02	+ 6,8	93	759,88	+7,5	93	+12,4	+4,8	Beau ; nuages.....	S. faible.
19	761,84	+8,6	88	762,00	+10,8	68	761,62	+10,7	69	762,30	+ 8,4	81	762,84	+ 7,5	90	763,13	+4,6	95	+11,7	+6,3	Très-nuageux.....	O. assez fo
20	763,74	+3,4	97	763,22	+ 9,5	80	762,19	+12,0	65	762,44	+10,1	72	763,00	+ 6,6	85	763,50	+5,5	92	+12,2	+1,9	Beau.....	S. faible.
21	766,48	+2,0	94	767,33	+ 8,6	87	766,78	+ 6,0	90	767 74	+ 4,8	96	768,44	+ 1,6	98	768,23	—0,4	98	+ 6,9	+1,8	Couvert; brouillard.. .	O. faible.
22	767,53	+1,2	91	766,93	+ 6,1	89	765,05	+10,2	76	764,88	+ 7,4	85	765,21	+ 3,4	93	764,41	+1,1	96	+10,6	—1,5	Très-vaporeux..... .	S.S.O. t.-fa
23	765,17	0,0	98	765,63	+ 2,0	98	764,75	+ 3,0	96	764,87	+ 3,8	92	764,96	+ 2,5	95	765,05	+0,8	97	+ 3,9	—0,2	Couvert; brouillard....	S.S.E. t.-fa
24	764,66	+2,0	89	763,87	+ 6,1	82	762,90	+ 3,8	90	762,44	+ 1,7	92	761,87	+ 1,0	96	761,31	—0,1	97	+ 6,4	+0,3	Beau ; vapeurs.	E.S.E. faib.
25	762,42	+1,6	94	762,77	+ 7,2	84	762,92	+ 3,2	88	763,85	+ 7,0	97	764,28	+ 6,8	98	764,62	+6,4	98	+ 8,6	—0,8	Couvert.....	E.S.E. tr.-fa
26	768,10	+5,8	92	768,52	+ 6,8	82	768,23	+ 7,0	82	769,21	+ 6,4	82	769,48	+ 5,6	87	769,48	+5,0	88	+ 7,0	+4,1	Couvert.....	N O. faible.
27	769,51	+3,9	96	769,29	+ 6,4	85	768,57	+ 8,0	80	769,28	+ 6,9	87	769,78	+ 6,4	90	769,70	+6,3	91	+ 8,4	+3,4	Couvert....	N.O. faible
28	770,63	+6,2	88	770,49	+ 8,4	72	769,85	+ 8,6	71	770,17	+ 7,2	85	770,38	+ 4,4	92	769,99	+4,6	91	+ 8,9	+6,0	Couvert.....	N. O. faible

Observation faite à 9 h. 15m.

Quantité de pluie en millimètres tombée pendant le mois : Cour, 15mm,87; terrasse, 13mm,61.

Digitized by Google

RECHERCHES SUR LA COMPOSITION DES ŒUFS ET DES MUSCLES DANS LA SÉRIE DES ANIMAUX ;

PAR MM. A. VALENCIENNES ET FREMY (1).

ŒUFS.

Les anatomistes qui se livrent à de nouvelles recherches sur les œufs des animaux sont toujours obligés de remonter aux époques, déjà éloignées, de la publication des Mémoires de MM. Prevost et Dumas d'abord, et ensuite de Carl-Ernest Baër. La découverte des premiers confirma les opinions de Guillaume Cruikshanks, fondées sur des observations et des expériences exactes; celle de M. Baër, qui est parvenu à voir les premiers rudiments de l'ovule, jusque sous le stroma de l'ovaire des Mammifères, fit faire un nouveau pas à l'ovologie.

Cet illustre anatomiste, ayant pour but de suivre l'évolution du fœtus, non-seulement dans l'œuf des animaux de cette classe, mais encore dans les espèces diverses du règne animal, n'a pas cherché à connaître la nature des liquides de l'œuf, ni celle des corps tenus en suspension ou en dissolution dans ces liquides.

La même direction d'idées a conduit les travaux des anatomistes qui ont traité ce sujet après M. Baër. Nous nous écarterions beaucoup trop du but que nous nous proposons ici si nous essayions de faire un historique de ces travaux successifs.

Nous avons cependant cru utile de rappeler la marche suivie par l'habile anatomiste de Kœnisberg et par ses suc-

(1) Le Mémoire que nous publions ici sur les œufs et les muscles des différents animaux doit être considéré comme un extrait représentant la partie chimique du travail complet que nous nous proposons d'insérer prochainement dans les *Archives du Muséum*.

Digitized by Google

cesseurs, pour expliquer comment on n'a encore mentionné, pour ainsi dire qu'en passant, ce que le microscope faisait découvrir dans le vitellus des différents œufs.

Ainsi, il nous paraît hors de doute que M. Baër a vu les granules vitellins des différentes espèces de raies ou de squales dont nous allons parler dans ce travail, sans les étudier avec détails. Il n'a pas cherché à en connaître la nature intime par le secours de l'analyse chimique. Il se borne, en effet, à dire que le jaune est constitué par un liquide visqueux, par des granules albumineux incolores, et par une graisse presque toujours divisée en gouttelettes. Ce jaune est enveloppé de blanc; mais M. Baër n'a pas cherché s'il est coagulable, comme celui de l'œuf de poule.

En un mot, ce savant a vu dans les œufs de ces cartilagineux, et dans ceux des autres animaux, un mélange de principes immédiats semblable à celui qui constitue les œufs d'oiseaux, et toujours composé d'un jaune, ou vitellus, entouré de blanc, liquide albumineux, le tout contenu dans une membrane externe aussi variée par sa nature que par ses couleurs.

Nous avons lieu de croire que M. Vogt a aperçu quelques granules vitellins dans le vitellus du crapaud accoucheur (*Alytes obstetricans*, Dum.). Il est cependant moins précis que M. Baër.

On peut aussi penser que M. Strauss a vu les granules vitellins, dont nous parlerons dans notre Mémoire, puisqu'il décrit, dans son beau travail sur l'anatomie du hanneton, le vitellus des œufs de ces Coléoptères, formé d'une bouillie liquide, composée de grains, et présentant à la surface de l'enveloppe de l'œuf une couche de globules.

On trouve encore l'indication de ces granules dans le travail de MM. Baudrimont et Martin Saint-Ange, couronné par l'Académie des Sciences. Mais ces auteurs ne les ont pas séparés du reste du vitellus, pour en faire le

Digitized by Google

sujet d'une étude spéciale. Il les ont représentés au milieu des gouttelettes d'huile qui nagent dans le jaune des œufs de grenouille.

Les autres naturalistes qui ont étudié les œufs de diverses Annélides, des Helminthes, des Insectes, des Arachnides, des Crustacés, des Mollusques céphalopodes, gastéropodes ou acéphales, parlent de globules, sans les distinguer des gouttelettes de graisse.

MM. Virchow et Jean Muller ont décrit également avec détail, dans plusieurs Mémoires, les granules que l'on observe dans les œufs de différents poissons; mais ces corps ont été considérés généralement comme des substances albumineuses.

MM. Dumas et Cahours sont les premiers qui aient signalé nettement dans l'œuf de poule un principe immédiat particulier, la vitelline, caractérisée par ses propriétés physiques et par sa composition déduite de l'analyse chimique.

Les recherches n'avaient pas été poussées plus loin, et l'on se contentait d'appeler du même nom collectif d'œuf, tous les produits de l'ovaire, servant, chez tous les animaux, après la fécondation, à la reproduction d'individus semblables à ceux qui les ont sécrétés, quand les nouveaux individus sont parvenus à l'âge adulte.

Cependant, en examinant avec attention les œufs des nombreux ovipares, les anatomistes y observaient des différences très-notables, et qui prouvaient que ces corps reproducteurs étaient aussi variés que les animaux auxquels ils doivent donner naissance. Ainsi, pour ne citer que quelques faits, on avait depuis longtemps remarqué l'absence de l'allantoïde dans les œufs des ovipares vivant dans l'eau; le manque de chalazes, la minceur de la membrane vitelline devenant telle, qu'on a de la peine à la voir sous le microscope. L'un de nous avait déjà observé que plu-

Digitized by Google

sieurs espèces d'œufs ne se durcissent pas par la cuisson dans l'eau bouillante.

L'Académie avait pensé depuis longtemps qu'il était utile d'appeler l'attention des hommes de science sur ce genre d'investigation, en mettant au concours des questions relatives à la composition intime de l'œuf. Elle a été assez heureuse pour trouver, dans plusieurs Mémoires qui lui ont été adressés, une partie des réponses qu'elle désirait.

Sentant nous-mêmes qu'il était important de donner de l'extension aux recherches déjà faites sur la composition des œufs, nous avons entrepris ce travail en commun, parce que les questions qu'il soulève sont à la fois du ressort de la zoologie et de la chimie analytique.

Un sujet aussi vaste, et qui exige l'étude suivie d'œufs d'animaux appartenant aux différentes classes du règne animal, ne peut être épuisé dans un seul Mémoire; aussi sommes-nous loin de considérer nos recherches comme complètes.

Nous nous proposons seulement, en publiant ce premier Mémoire, de faire ressortir les différences qui existent dans la composition des œufs, et de poser quelques principes généraux, qui seront développés dans des travaux subséquents.

Des œufs d'Oiseaux.

Ce que nous venons de dire au commencement de ce Mémoire explique suffisamment le silence que nous gardons sur la composition de l'œuf de poule pendant l'évolution du fœtus, et sur les recherches antérieures relatives aux membranes qui enveloppent les premiers rudiments du poulet contenu dans l'œuf.

Nous recherchons uniquement ici la nature des deux substances : le blanc (albumen), et le jaune (vitellus), afin

Digitized by Google

de partir de ce point de comparaison pour étudier les œufs des autres animaux.

La composition des œufs d'oiseaux a été nettement établie par les nombreux travaux publiés d'abord par Vauquelin, Bostock, et ensuite par MM. Chevreul, John, Dumas et Cahours, Lecanu, Gobley, Martin Saint-Ange et Baudrimont, Scheerer.

Le vitellus de l'œuf ayant donné lieu dans ces derniers temps, surtout de la part de M. Gobley, à des travaux importants qui nous ont paru établir nettement sa composition, nous nous sommes proposés dans ce Mémoire d'étudier particulièrement l'albumen, et de rechercher si les œufs d'oiseaux contiennent, suivant leurs espèces, des albumines qui diffèrent réellement les unes des autres.

Nous avons pensé d'abord qu'il était intéressant de fixer le rapport qui existe entre les poids des vitellus et ceux des albumens des œufs d'oiseaux pris dans les différentes espèces.

Nos expériences établissent que le poids de l'albumen des œufs d'oiseaux est toujours plus élevé que celui du vitellus; en représentant ce dernier par l'unité, les poids des albumens sont exprimés, d'après quelques-unes de nos déterminations, par les nombres suivants :

	Poids de l'albumen.
Moineau.....	3,8
Mésange.....	1,9
Pie.....	5,4
Faisan argenté.....	1,3
Faisan commun....	2,1
Buzard cendré.....	4,6
Ibis sacré.....	3,7
Pigeon.....	3,0
Canard de Barbarie.	1,3
Oie de Guinée.....	1,6

Le tableau précédent démontre en outre que le rapport

Digitized by Google

qui existe entre le poids de l'albumen et celui du vitellus est très-variable et qu'il ne paraît pas dépendre de l'espèce et de la grosseur des oiseaux; car il n'est pas constant pour des œufs d'oiseaux qui appartiennent au même ordre, comme le moineau et la mésange, et il devient presque le même chez des oiseaux bien différents les uns des autres, tels qu'un Passereau et un Palmipède.

Nous avons voulu déterminer le rapport pondéral de l'albumen au vitellus dans des œufs qui ont deux jaunes; cette expérience a été faite sur des œufs de cygne : nous avons trouvé que dans ce cas l'albumen et le vitellus présentent exactement le même poids.

L'albumen des œufs d'oiseaux est formé par un liquide albumineux renfermé dans les cellules d'un tissu cellulaire peu serré, dont les membranes hyaloïdes sont d'une parfaite transparence avant d'être plongées dans l'eau.

Nous avons soumis ces membranes à quelques essais dont nous reproduirons ici les principaux résultats.

Le nombre et l'épaisseur des membranes varient avec les espèces; ces membranes sont peu abondantes dans les Passereaux et plus nombreuses dans les Palmipèdes que dans les Gallinacés.

Les membranes perdent leur transparence sous l'influence de quelques réactifs salins et par l'action seule de l'eau à la température ordinaire. Leur opacité augmente encore lorsqu'on porte l'eau à l'ébullition : nous nous servons quelquefois de cette dernière méthode pour constater la présence des membranes minces qui existent dans certains albumens; mais cette expérience n'est possible que lorsque la liqueur contenue dans les sacs membraneux ne se coagule pas par la chaleur : ce cas se présente assez souvent, comme nous l'établirons plus loin.

Les membranes contenues dans les œufs d'oiseaux s'y trouvent toujours en quantité très-faible; d'après nos déterminations elles atteignent rarement la millième partie

Digitized by Google

du poids de l'albumen : elles laissent par la calcination une cendre qui est formée presque exclusivement de phosphate de chaux; ce dernier sel nous a paru beaucoup plus abondant dans les membranes que dans le liquide qu'elles contiennent dans leur intérieur. Quant à la partie organique de ces membranes, elle est évidemment de nature albumineuse, car elle se dissout dans l'acide chlorhydrique en produisant au contact de l'air une belle coloration bleue.

Les albumens des œufs appartenant aux différentes espèces d'oiseaux contiennent tous une quantité de substance solide qui paraît constante ou du moins qui varie seulement de 10 à 12 pour 100. Ce résultat ressort nettement des déterminations suivantes :

	Résidu de la dessiccation opérée à 130°.
Albumen de traquet.....	10,4 pour 100.
» de rossignol.....	12,4 »
» d'effarvate.....	12,0 »
» de bruant.....	12,0 »
» de merle.....	12,0 »
» de roitelet.....	10,7 »
» de grisette.....	10,3 »
» de babillarde.....	10,1 »
» de fauvette.....	12,1 »
» d'oie de Guinée...	10,5 »
» de cygne.....	11,0 »
» de poule.....	11,0 »

Il était intéressant d'apprécier la nature et les proportions de substances minérales contenues dans ces résidus. Nous reproduisons ici les résultats de nos déterminations :

Digitized by Google

	Résidu de l'évaporation de l'albumen. Cendres.
Bruant	6,3
Merle	8,4
Tarier	9,0
Roitelet	6,0
Grisette	6,9
Babillarde	8,9
Fauvette à tête noire	8,2
Oie de Guinée	5,9
Ibis sacré	5,9
Cygne	6,8

On voit que les proportions de substances minérales contenues dans les albumens des œufs d'oiseaux varient peu, et qu'elles dépassent rarement un centième du poids de l'albumen.

Ces substances minérales sont formées essentiellement de chlorure de sodium : elles contiennent cependant une petite quantité de phosphate de chaux et de carbonate alcalin.

Il est difficile de décider à quel état se trouve le chlorure de sodium dans l'albumen des œufs et de savoir si ce sel existe dans l'œuf à l'état de simple mélange ou en combinaison avec la substance azotée; pour jeter quelque jour sur cette question, nous avons examiné de l'albumine d'œuf coagulée par différents réactifs, tels que l'alcool, l'acide azotique; nous l'avons soumise également à l'action de la chaleur, en comparant ensuite cette albumine coagulée à celle qui se trouve en dissolution dans l'albumen. Nos analyses démontrent que, par la coagulation, l'albumine se débarrasse d'une partie du sel marin qu'elle contenait d'abord, mais qu'à cet état de coagulation, et une fois desséchée, elle retient encore du chlorure de sodium dont la proportion dépasse quelquefois 2 p. 100. Doit-on admettre que dans ce cas le sel minéral se trouve en combinaison avec

Digitized by Google

la matière organique? Nous ne le pensons pas : la substance albumineuse nous paraît retenir le chlorure de sodium, en vertu de cette *affinité capillaire* qui fait qu'un mordant est retenu par un tissu, et sur laquelle M. Chevreul a si justement appelé l'attention des chimistes.

Après avoir déterminé les quantités d'eau, de substances organiques et de matières minérales contenues dans les albumens des œufs d'oiseaux, nous avons voulu rechercher si l'albumine retirée des œufs appartenant à des ordres différents se présente toujours avec des propriétés identiques et si, en un mot, il n'existe pas plusieurs espèces d'albumine.

Nous devions rencontrer dans cette partie de notre travail des difficultés qui seront appréciées de tous les expérimentateurs.

Les matières albumineuses présentent sans aucun doute des caractères qui les distinguent suffisamment des autres substances provenant de l'organisation animale, mais elles offrent entre elles de telles analogies, en raison même du rôle physiologique qu'elles doivent remplir, que des propriétés servant à les distinguer les unes des autres étaient difficiles à trouver.

Après avoir employé inutilement un certain nombre de sels métalliques, quelques réactifs organiques, et avoir reconnu que ces corps exercent tous la même action sur les différentes albumines, nous avons reconnu que l'étude des conditions dans lesquelles les albumines se coagulent par l'action de la chaleur ou sous l'influence des acides, permettait de constater dans ces substances des différences remarquables.

En soumettant à un examen général les œufs fournis par les principaux ordres d'oiseaux, nous avons reconnu qu'il existe un certain nombre d'albumines qui, semblables à celle que l'on trouve dans l'œuf de poule, se coagulent

Digitized by Google

toujours par la chaleur et se précipitent entièrement par l'action de l'acide azotique.

Vient ensuite une albumine qui se précipite sous l'influence de l'acide azotique, comme la précédente, mais qui ne se coagule plus par la chaleur, lorsqu'on l'étend de 3 volumes d'eau.

Nous avons trouvé en outre une troisième espèce d'albumine, qui diffère des deux précédentes, car elle ne se coagule pas par l'ébullition et ne précipite pas immédiatement par l'acide azotique. Ce dernier réactif la transforme seulement, après quelques minutes de contact, en une gelée blanche et transparente.

Nous nous empressons d'ajouter que, pour éviter l'influence de la putréfaction sur le phénomène de la coagulation, nos expériences ont toujours été faites sur des œufs d'oiseaux fraîchement pondus, et que pour rendre nos observations comparables entre elles, nous avons opéré constamment sur des liqueurs albumineuses de même concentration.

En déterminant les circonstances de coagulation de la substance albumineuse des œufs d'oiseaux, on peut donc admettre qu'il existe dans ces œufs trois espèces d'albumine :

1°. Celle qui se coagule par l'action de la chaleur et par l'action des acides ;

2°. Celle qui ne se coagule que par l'action des acides, lorsqu'elle est étendue d'eau ;

3°. Celle qui dans les mêmes conditions que la précédente ne se coagule ni par l'action de la chaleur ni sous l'influence des acides.

Ce fait étant une fois constaté, nous avons passé en revue les œufs d'oiseaux appartenant aux six ordres établis par Cuvier, pour rechercher si les différences dans les propriétés de l'albumine correspondraient aux divisions zoologiques.

Digitized by Google

Ces recherches nous ont présenté les résultats suivants :

1°. Tous les œufs de Gallinacés contiennent une albumine qui est identique avec celle qui existe dans l'œuf de poule; elle est précipitée complétement par l'acide azotique et se coagule lorsqu'on porte la température de l'eau qui la tient en dissolution de 60 à 70 degrés : la coagulation par la chaleur est un caractère que l'on constate toujours avec certitude lors même que l'albumine de Gallinacés est étendue d'une grande quantité d'eau, à la condition toutefois d'opérer sur un œuf fraîchement pondu; car lorsqu'on garde pendant quelque temps un œuf de Gallinacé, son albumine se modifie et perd la propriété de se coaguler par la chaleur quand elle se trouve en présence d'une proportion d'eau considérable.

L'altérabilité de l'albumine des Gallinacés est variable avec les espèces; la décomposition se produit lentement dans l'œuf de poule et se détermine au contraire avec rapidité dans l'œuf de faisan. Cette modification de l'albumine de l'œuf peut rendre compte des insuccès que l'on constate lorsqu'on fait couver des œufs de Gallinacés pondus depuis quelques jours.

2°. Les œufs de Palmipèdes et d'Échassiers contiennent de l'albumine de la deuxième espèce, qui ne se coagule plus par la chaleur lorsqu'elle est étendue de 3 volumes d'eau, et qui se précipite immédiatement par l'acide azotique.

Lorsqu'on fait dissoudre l'albumine de Palmipède ou d'Échassier dans 2 volumes d'eau seulement, et qu'on porte la liqueur à l'ébullition, la matière albumineuse ne tarde pas à se coaguler, mais alors le précipité est gélatineux, transparent, et ne présente pas l'opacité de l'albumine de Gallinacés.

3°. Les œufs d'oiseaux de proie, de certains Passereaux et Grimpeurs contiennent une albumine qui nous paraît différer complétement des précédentes; elle ne se coagule plus par la chaleur ou par l'action de l'acide azotique.

Digitized by Google

Celle des espèces de la famille des Corvidées, et surtout celle de la pie, soumise à une dessiccation lente, laisse comme résidu une matière très-dure et transparente qui présente l'aspect du verre.

Toutes les albumines que nous venons de citer, soumises à l'analyse élémentaire, ont présenté la même composition.

Il nous restait enfin à rechercher si les différences que nous venons de constater se retrouveraient dans les albumines qui existent dans les vitellus et surtout dans les sangs d'oiseaux qui correspondent aux œufs que nous avions examinés.

Il est résulté de nos recherches à cet égard que, dans le vitellus des œufs comme dans le sérum du sang d'oiseaux, l'albumine ne présente pas les modifications que nous avons signalées précédemment et qu'elle possède toujours la propriété de se coaguler par l'action de l'acide azotique.

Tels sont les principaux résultats que nous avons constatés dans nos recherches sur les albumens des œufs d'oiseaux; ils établissent comme on le voit des différences incontestables entre les propriétés des liqueurs albumineuses qui les constituent, et viennent confirmer en quelque sorte les principes zoologiques qui ont servi de base à la classification des Oiseaux.

Faut-il admettre maintenant que les substances albumineuses qui se trouvent dans ces albumens constituent des principes immédiats particuliers? Nous avouerons franchement qu'il reste encore sur ce point dans notre esprit des doutes sérieux qui ne pourront être levés que par des recherches ultérieures sur les substances albumineuses.

Nous pensons que lorsque des corps organiques sont, comme dans le cas qui nous occupe ici, isomériques et qu'ils possèdent un grand nombre de caractères communs, des différences dans le point de coagulation par la chaleur ou de précipitation par l'action des acides sont importantes sans doute et doivent être constatées avec soin, mais ne

Digitized by Google

suffisent pas pour établir que ces corps constituent des principes immédiats distincts les uns des autres.

Des œufs de Poissons.

La grande famille des Poissons à squelette cartilagineux, désignée par M. Duméril sous la dénomination de *Poissons plagiostomes*, a été depuis divisée par les ichthyologistes récents en plusieurs familles.

Les raies de Linné et de Lacépède ont formé la famille des RAJIDÆ; les torpilles ont donné à la famille composée de ces poissons électriques leur nom de TORPEDINÆ; et enfin le genre des squales, subdivisé en plusieurs autres, est devenu la famille des SQUALIDÆ. En étudiant comparativement ces trois familles sous le rapport de l'ovologie, on y trouve des poissons ovipares et des ovovivipares.

Les raies pondent des œufs protégés par une enveloppe forte et résistante, sans être toutefois calcaire. Ils éclosent dans les profondeurs où la femelle sait les fixer au moment de la ponte, car il est très-rare de rencontrer, en explorant les plages de la mer, des œufs encore pleins. La coque n'est rejetée qu'après l'éclosion.

Les torpilles, qui ont été longtemps réunies avec les raies, sont ovovivipares; les petits éclosent dans l'oviducte de la mère.

Il en est de même des squales qui pour la plupart sont ovovivipares; mais il y a parmi eux un genre, celui des roussettes, dont les femelles sont ovipares. Les œufs ont une enveloppe d'apparence cornée très-résistante, et les quatre angles de ces singuliers œufs sont prolongés en longs filaments qui s'attachent fortement aux tiges des fucacées de haute mer, jusqu'à la naissance du petit.

Des œufs de Raie.

Un œuf de raie, pondu récemment, est enfermé dans une coque de vert bronzé, dont le tissu est composé de fibres

Digitized by Google

courtes et feutrées ; sa forme générale est un rectangle plus ou moins allongé et bombé des deux côtés : chaque angle est prolongé en une languette courbe. Le bord le plus long de ce rectangle s'étend en une membrane très-mince, jaunâtre, et qui paraît de même nature que la coque. En retirant avec précaution l'œuf de l'oviducte, on reconnaît que ces membranes sont sécrétées dans l'intérieur de la grosse glande blanche qui entoure l'origine de l'oviducte. La surface de chacune d'elles, étalée sous l'eau, a plus du double de celle de la coque.

En ouvrant cet œuf, on voit un jaune abondant contenu dans une masse gélatineuse transparente, qui représente le blanc de l'œuf de poule, quoiqu'il en soit totalement différent. Le jaune est au milieu de cette masse, dans une des cellules transparentes du blanc ; car le vitellus, comme l'a très-justement remarqué M. Baër, n'a pas de membrane vitelline assez résistante pour qu'on puisse l'observer sous le microscope, et encore moins séparer le jaune du blanc, l'en isoler.

Aussi, pour avoir la matière du jaune tout à fait pure, il faut la prendre dans un ovule formé près de se détacher de l'ovaire et avant d'entrer dans l'oviducte.

Nous venons de faire remarquer que ce blanc gélatineux ne ressemble en rien au blanc des œufs d'oiseaux : il n'entre pas en dissolution dans l'eau ; il n'éprouve pas, par la chaleur ou par l'action des acides, une coagulation comparable à celle de l'albumine ordinaire.

En examinant cette gelée avec soin, nous avons reconnu qu'elle était formée par des vésicules dont les membranes élastiques contiennent un liquide très-aqueux, et qui ne présente en dissolution que des traces d'albumine. Lorsque ces vésicules sont exposées à l'air pendant quelques jours, elles se vident en quelque sorte, perdent leur consistance gélatineuse, et produisent alors un liquide légèrement albumineux qui tient en suspension quelques membranes transparentes.

Digitized by Google

L'alcool produit également la destruction de la masse gélatineuse en déterminant la coagulation des membranes.

En soumettant enfin ce blanc d'œuf de raie à une évaporation dans le vide, on reconnaît qu'il ne contient que des traces de substances organiques.

On voit donc que le blanc d'un œuf de raie, qui se trouve en proportion très-faible par rapport au jaune, est différent, sous tous les rapports, de l'albumine de l'œuf d'oiseau. L'étude du jaune de l'œuf de raie devait établir, du reste, des différences encore plus remarquables entre les œufs d'oiseaux et ceux des poissons cartilagineux.

Lorsqu'on soumet le jaune de l'œuf de raie à un examen microscopique, on reconnaît qu'il est formé par un liquide assez fluide, tenant en suspension des gouttes d'un corps gras légèrement coloré en jaune, et une quantité considérable de petits grains blancs et transparents, d'une forme régulière. Nous avons examiné ces granules dans les différentes espèces de raies qui abondent sur les marchés de Paris.

Des œufs de Torpille.

Les torpilles ont été séparées non-seulement des raies, mais même de la famille des Rajidées. Depuis que les ichthyologistes ont appris à connaître les différences que présentent ces espèces de cartilagineux, sur les côtes du Brésil, au cap de Bonne-Espérance ou dans les mers de l'Inde, l'appareil électrique qui leur donne cette force remarquable est resté le caractère essentiel et le plus apparent de cette famille. Les côtes des départements du Morbihan, de la Charente-Inférieure, et celles qui suivent le littoral de l'Océan jusqu'à la frontière d'Espagne, nourrissent un grand nombre d'individus de l'espèce du *Torpedo marmorata;* on en distingue un plus grand nombre d'espèces dans la Méditerranée.

Nous avons pu examiner plusieurs torpilles des côtes de

Digitized by Google

la Rochelle, grâce à la complaisance de M. le Dr Sauvé, médecin établi dans cette ville. Nous avons reconnu que ces poissons, si semblables aux raies par leur forme générale, ont un mode de génération tout à fait différent de celui des raies, et qu'elles ressemblent, sous ce rapport, au plus grand nombre des squales. Nous avons trouvé, dans les oviductes de l'une d'elles, huit petits, quatre de chaque côté. Chaque fœtus près de naître avait, dans l'intérieur de l'abdomen, une assez grosse portion de son vitellus. Nous avons pu examiner ce liquide : nous y avons reconnu avec le microscope des granules d'apparence assez semblable à ceux des œufs de raie, quoique leurs formes fussent distinctes.

C'est la seule partie de l'œuf des torpilles que nous connaissions jusqu'à présent. Nous ne pouvons donc rien dire du blanc des œufs de ces cartilagineux.

Des œufs de Roussette.

Les œufs de nos roussettes sont rectangulaires, beaucoup plus longs, mais beaucoup plus étroits que ceux des raies. La coque en est dure, résistante, jaunâtre, d'apparence cornée, ainsi que le filament qui naît de chaque angle. On en trouve ordinairement un dans chaque oviducte, comme dans nos raies, auquel en succède bientôt un autre, après la ponte de celui qui s'est complété dans le ventre de la femelle. L'ovaire de la roussette, plus étroit que celui de la raie, lui ressemble d'ailleurs par sa structure, et sous son stroma on trouve un nombre plus ou moins considérable d'ovules de grosseurs très-différentes, depuis ceux à peine perceptibles jusqu'à ces sphères vitellines près de se détacher de l'ovaire pour entrer dans l'oviducte. En ouvrant un œuf, on voit le vitellus en remplir la plus grande partie. Sa membrane vitelline est encore plus difficile à voir que celle de la raie : le blanc est plus visqueux, les membranes qui le contiennent sont beaucoup plus délicates; le liquide, ce-

Digitized by Google

pendant, ne renferme aussi que des traces d'albumine. L'alcool produit de même la destruction de la masse gélatineuse, en déterminant la coagulation de ces membranes.

On voit que le blanc d'un œuf de roussette ressemble beaucoup à celui d'un œuf de raie.

Le jaune de cet œuf présente aussi une grande ressemblance avec celui d'un œuf de raie. Le liquide très-fluide qui le compose tient en suspension des gouttelettes d'huile jaunâtre, et une quantité de petits grains blancs transparents, d'une forme régulière, mais différente de celle des granules des diverses espèces de raies que nous avons examinées.

Des œufs de Milandre (Squalus galeus, Lin.).

Si les roussettes présentent les mêmes conditions ovologiques que les raies, les autres squales en offrent avec les torpilles, car ils sont, comme celles-ci, ovovivipares.

Nous avons pu nous procurer une femelle de milandre (*Sq. galeus*, Lin.)près de mettre bas. Elle avait dans l'oviducte droit six petits, et cinq dans le gauche. Chaque fœtus était enfermé dans une membrane, sorte de coque, qui est mince comme de la baudruche.

Dans cette membrane, véritable coque des œufs de l'animal, le petit, déjà tout formé, y était étendu, la queue seule repliée à partir de l'anale. Trois petits avaient la tête du côté de la mère, et trois autres étaient couchés en sens inverse, la tête du côté de la queue. La coque de l'œuf n'était pas encore percée, et cependant trois petits du côté droit et deux du côté gauche avaient déjà leur vitellus entièrement rentré dans la cavité abdominale. Il ne restait plus que quelques traces de la matière gélatineuse du blanc. Le vitellus était très-diminué ; car il ne consistait plus qu'en un cylindre en fuseau, long d'environ 5 centimètres, et n'ayant pas 1 centimètre dans sa plus grande épaisseur.

Toute cette matière vitelline a été recueillie et examinée

Digitized by Google

avec soin, et nous y avons trouvé, à l'aide du microscope, une très-grande quantité de petits granules d'une forme différente de celle de nos raies.

Des œufs de l'Émissole (Squalus mustelus, Lin.)

Une autre espèce de squale, l'émissole (*Squalus mustelus*, Lin.), nous a aussi donné un nombre assez considérable d'ovules ; car la gestation de la femelle n'était pas assez avancée pour que les œufs fussent engagés dans l'oviducte. Cette circonstance, heureuse pour notre travail, nous a prouvé que les jaunes des œufs de squale, encore renfermés dans les capsules ovariennes, offrent les mêmes compositions que ceux des œufs de raie. Nos observations sont donc établies d'une manière tout à fait comparative.

Des œufs de l'Ange (Squatina angelus, Dum.)

L'ange, un des grands cartilagineux de nos mers, appartient à une famille toute spéciale. Sa bouche, fendue à l'extrémité du museau, ses larges pectorales, séparées en avant du tronc par une profonde échancrure, le distinguent des raies et des squales. Il a cependant, comme les premières, la tête large et déprimée, les yeux situés à la face dorsale et non sur les côtés ; mais il a, comme les seconds, les fentes branchiales sur les côtés du cou ; et la queue, grosse et conique, ne se distingue plus du reste du tronc.

Nous n'avons pu obtenir cette année qu'une seule femelle d'ange, et tous ses ovules étaient encore maintenus dans les capsules ovariennes, sous le stroma de l'ovaire qui, par sa forme, sa texture et même par sa couleur, ressemble beaucoup plus à celui des raies qu'à celui des squales.

Nous avons recueilli avec soin les vitellus en voie de développement ; nous y avons trouvé, comme dans les précédents, une matière grasse divisée en gouttelettes, nageant dans un liquide visqueux et albumineux, avec un grand

Digitized by Google

nombre de granules d'une forme spéciale et en très-grande abondance.

De l'Ichthine.

Les observations faites sur les œufs de cartilagineux d'espèces et de genres si variés nous ont conduits à faire l'analyse immédiate de ces différents jaunes.

Ayant constaté que les grains tenus en suspension dans le liquide étaient insolubles dans l'eau, et que ce liquide ne se troublait pas par l'eau, la marche à suivre était d'une grande simplicité.

Après avoir pris les précautions convenables pour laisser écouler le jaune sans mélange dans une grande quantité d'eau distillée, les grains, étant plus denses que l'eau, sont tombés au fond du liquide, et ils ont été lavés par décantation, jusqu'à ce que l'eau de lavage ne contînt plus de traces d'albumine et de substances salines. Les grains ont été débarrassés complétement des corps gras, par des lavages successifs à l'alcool et à l'éther. Il est resté, après ces traitements, une quantité considérable de grains dont on peut obtenir facilement en quelques heures plusieurs centaines de grammes, et qui présentent, sous le microscope, tous les caractères d'une pureté absolue.

L'analyse immédiate que nous venons de décrire sommairement nous a donc démontré que le vitellus d'un œuf de cartilagineux est formé :

Par un liquide albumineux, tenant en dissolution quelques sels minéraux, principalement des chlorures et des phosphates, et en suspension des grains blancs de forme constante et régulière dans chaque espèce, mais variable d'une espèce à l'autre, et mélangés à une petite quantité de graisse phosphorée.

Cette matière grasse est soluble dans l'alcool et l'éther ; elle forme, avec l'eau, une sorte de mucilage ; elle présente

Digitized by Google

de l'analogie avec l'acide gras qui existe dans le cerveau, et que l'un de nous a décrit sous le nom d'*acide oléophosphorique*.

Quant aux grains blancs, ils nous paraissent constituer un principe immédiat nouveau, dont nous allons faire connaître les propriétés et la composition, et auquel nous avons donné le nom d'ICHTHINE.

L'ichthine est douce au toucher; elle présente jusqu'à un certain point l'aspect de l'amidon.

Les granules d'ichthine extraits du jaune d'un œuf de *Raie bouclée* récemment pondu, se présentent sous la forme de petites tables rectangulaires dont les arêtes sont arrondies et les angles émoussés; les plus gros ont 4 centièmes de millimètre. Leur transparence est parfaite, mais les arêtes sont très-nettement dessinées. Ils ont le même aspect dans les vitellus en voie de formation et encore renfermés dans les vésicules ovariennes, et quelle que soit la grosseur de ces ovules, depuis ceux qui n'ont que $0^m,01$ de diamètre, jusqu'aux plus gros qui ont $0^m,03$. Dans les ovules plus petits et dont le diamètre variait de $0^m,001$ à $0^m,005$, les granules avaient la même forme en tablettes, mais ils étaient beaucoup plus petits et ne dépassaient pas 2 centièmes de millimètre en longueur. En général, ces granules ont les mêmes dimensions dans un même ovule.

Mais les différences que nous venons de signaler montrent que les granules grossissent avec le développement des ovules, et que les vitellus peu développés ont des grains d'ichthine beaucoup moins gros que ceux qui sont près d'entrer dans l'oviducte ou dans l'œuf.

Les raies dont ces vitellus ont été extraits, n'atteignent guère que $0^m,50$ de longueur, la caudale non comprise, et leur poids est de 4 à 5 kilogrammes.

En examinant différents granules d'ichthine, nous avons rencontré, mais exceptionnellement, des tablettes presque

Digitized by Google

carrées, d'autres en pentagone régulier ou irrégulier; ces derniers granules ont de la tendance à se diviser. Nous n'avons pu encore établir si ces déformations tiennent à quelques causes constantes, ou si elles sont dues à de simples variations accidentelles. Nous avons essayé de briser de ces grains dans un mortier d'agate, et nous avons vu qu'en général ils se fendent suivant les axes des rectangles de ces tablettes, et non pas suivant leurs diagonales.

Nous avons étudié les granules des vitellus développés de la plus grande de nos raies, celle que l'on nomme sur nos marchés la raie douce ou la raie blanche. C'est la *Raia oxyrhynchus* de Linné. Nous ne devons pas négliger de faire remarquer que les individus de cette espèce de raie ont jusqu'à 2 mètres de long, sans y comprendre la queue, qu'ils atteignent à un poids de 100 kilogrammes; et que cependant les œufs de cette raie donnent les plus petits granules d'ichthine.

Ceux de la raie chardon (*Raia fullonica*) et ceux de la raie ronce (*Raia rubus*) ressemblent beaucoup à ceux de la raie bouclée; la différence la plus sensible consiste dans leur petite dimension. Les plus grands n'ont que 3 centièmes de millimètre. On trouve dans les œufs de ces deux raies des granules elliptiques très-réguliers; mais la forme rectangulaire est cependant la plus ordinaire.

Les grains vitellins de la torpille marbrée (*Torpedo marmorata*), de la Rochelle, ont une forme différente de ceux des raies, car elle est elliptique ou circulaire; on ne voit aucun granule rectangulaire, d'ailleurs leur transparence et leurs autres propriétés physiques sont les mêmes. Ils n'ont que 2 centièmes de millimètre, mais les torpilles n'atteignent jamais de grandes dimensions.

L'ichthine des squales se montre en granules plus gros, plus allongés que ceux des raies, et leurs contours sont des ovales très-longs. Ceux du milandre (*Squalus galeus*, Lin.)

Digitized by Google

ont 6 centièmes de millimètre. Nous avons aussi observé quelques variations dans la forme. En cherchant avec soin sous le microscope, nous avons vu un de ces granules ovoïde, mais pointu aux deux bouts. Une autre tablette avait les deux longs côtés droits; et elle était terminée par deux triangles isocèles. La figure de ce singulier granule était donc celle d'un hexagone très-allongé.

L'émissole (*Squalus mustelus*, Lin.), plus petit que le milandre, a les granules d'ichthine presque aussi gros que ceux du milandre. Ils ont 5 centièmes de millimètre; leur forme diffère de toutes les autres. Ces grains sont ronds, mais réunis souvent ensemble de manière à prendre les formes les plus variées.

Enfin la roussette (*Squalus canicula*, Lin.) a des granules en tablettes rectangulaires aux angles arrondis, semblables à ceux des raies. Ils ont 4 centièmes de millimètre sur leur plus long côté.

L'ange (*Squatina angelus*, Dum.) a des granules aussi gros que l'émissole ; ils sont elliptiques comme ceux des squales, aussi gros, car ils ont 6 centièmes de millimètre.

Nous concluons donc, de la comparaison des formes de ces granules dans les différentes espèces citées, que les espèces ovipares, comme les raies et les roussettes, ont des granules en tablettes plus ou moins rectangulaires, mais semblables entre elles, tandis que les cartilagineux vivipares, comme les torpilles ou les squales, ont des granules en tablettes généralement ovales ; que si le développement de l'ovule influe sur la grosseur du granule d'ichthine, la taille du poisson n'exerce aucune influence sur la grosseur des granules.

Les grains d'ichthine sont insolubles dans l'eau, l'alcool et l'éther ; ils sont d'une transparence complète et ne deviennent pas opaques lorsqu'on les maintient, même pendant longtemps, dans l'eau bouillante ; l'acide chlorhydri-

Digitized by Google

que les dissout sans produire de coloration violette : ces deux dernières propriétés établissent des différences bien nettes entre l'ichthine, l'albumine et la vitelline.

Tous les acides concentrés opèrent la dissolution de l'ichthine; quand ils sont étendus, ils n'agissent pas sur cette substance, à l'exception toutefois des acides acétique et phosphorique, qui dissolvent immédiatement les grains d'ichthine, même lorsqu'ils sont étendus d'une grande quantité d'eau.

Les dissolutions de potasse et de soude opèrent avec lenteur la dissolution de l'ichthine.

L'ichthine paraît insoluble dans l'ammoniaque.

Les grains d'ichthine soumis à la combustion ne laissent pas sensiblement de cendres.

Lorsque l'on considère la facilité avec laquelle l'ichthine peut être retirée des œufs de certains poissons, et que l'on reconnaît que les grains d'ichthine, par la régularité de leur forme, offrent tous les caractères d'un principe immédiat pur, il est impossible de ne pas considérer cette substance comme une des plus intéressantes de l'organisation animale.

L'ichthine, soumise à l'analyse, a présenté la composition suivante :

	I.	II.	III.	IV.
Matière.....	0,452	0,427	0,282	0,228
Eau.....	0,275	0,300	0,195	0,150
Acide carbonique.	0,845	0,800	0,520	0,420
Dosage de l'azote.				
Matière.....	0,332	0,406	»	»
Azote.....	0,049	0,06265	»	»
En centièmes.				
Carbone.....	50,9	51,0	50,2	50,2
Hydrogène.....	6,7	7,8	7,6	7,3
Azote.....	14,7	15,4	»	»

Digitized by Google

Nous avons trouvé dans l'ichthine une proportion de phosphore qui peut aller jusqu'à 1,9 pour 100; elle ne paraît pas contenir de soufre.

La composition centésimale de cette substance serait donc :

G.....	51,0
H.....	6,7
Az.....	15,0
Ph.....	1,9
O.....	25,4

On pourrait facilement croire, et nous nous le sommes demandé en effet, si ces tablettes à forme si régulière ne seraient pas de petits cristaux.

Bien que nos observations aient suffisamment éloigné les doutes à cet égard, nous avons eu recours à l'obligeance de M. de Senarmont, qui a bien voulu examiner nos granules au moyen de l'appareil de polarisation.

Cet examen lui a prouvé, comme à nous, que les granules d'ichthine ne sont pas cristallisés.

Des œufs de Poissons osseux.

Il nous paraît inutile, pour l'objet de ce Mémoire, de passer en revue les nombreuses familles de poissons dont le squelette est osseux ou fibreux, et qui sont réunies, d'une manière générale, sous la dénomination de *Poissons osseux*. Les espèces qui appartiennent à ces groupes ont été étudiées avec tant d'ardeur, et réunies dans nos collections en si grand nombre, que l'un de nous en a déjà décrit plus de 4,000.

L'ovule ou l'œuf de ces poissons change la composition de ses liquides pendant son séjour dans l'oviducte ; en effet, cet ovule encore enfermé dans sa capsule ovarienne est plus au moins opaque, à cause de la graisse qu'il renferme. Détaché, il devient transparent, le vitellus entouré de sa substance albumineuse est nettement visible, sans que sa

Digitized by Google

membrane vitelline soit d'une épaisseur plus appréciable, et l'ichthuline, dont nous parlerons plus bas, est remplacée par l'albumine. Ainsi l'œuf qui ne montre que quelques traces d'albumine quand il est encore attaché à l'ovaire, dévient très albumineux quand il est libre dans l'oviducte.

Nous avons découvert dans les œufs de poissons osseux des principes immédiats tout à fait différents de l'ichthine, des raies et des squales.

L'étude des œufs de la carpe nous a permis d'apprécier ces différences.

Des œufs de Carpe.

Lorsque l'on étudie sous le microscope un ovule de carpe peu avancé, on reconnaît que le liquide tient en suspension beaucoup de gouttelettes de graisse légèrement colorée, au milieu desquelles on voit nager des granules transparents, en tablettes, qui rappellent tout à fait ceux des vitellus de la raie.

La dorade de la Chine, vulgairement le poisson rouge, est une autre espèce de carpe dont les ovules présentent les mêmes granules mêlés à des gouttes d'huile.

De l'Ichthidine.

Malgré la ressemblance de leur forme, les granules dont nous venons de parler ne sont pas formés d'ichthine; car en traitant l'ovule écrasé d'une carpe par une petite quantité d'eau, les grains s'usent peu à peu et disparaissent complétement au bout de quelques minutes. La substance qui les constitue est donc soluble dans l'eau, tandis que l'ichthine est insoluble.

En admettant pour un moment que ces grains soient formés d'ichthine, on aurait pu attribuer leur solubilité à l'action du liquide albumineux existant dans l'œuf de carpe, qui jouirait alors de la propriété de dissoudre l'ichthine de la raie. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons intro-

Digitized by Google

duit quelques grains d'ichthine de raie dans le liquide des œufs de carpe écrasés ; le tout a été soumis à l'action de l'eau. Nous avons vu alors les granules de l'œuf de la carpe disparaître peu à peu ; ceux d'ichthine n'ont pas été altérés par l'eau.

Il nous paraît donc démontré qu'il existe dans l'œuf de certains Cyprinoïdes une substance soluble dans l'eau, qui se présente sous la forme de grains rectangulaires.

Quoiqu'il nous ait été impossible de donner à cette observation toute la netteté désirable, parce que les grains solubles n'ont pas pu être isolés, cependant nous croyons devoir, en attendant des résultats plus satisfaisants, donner un nom à cette substance : nous proposons celui d'ICHTHIDINE.

En employant des dissolutions salines, nous avons toujours vu ces grains disparaître dans les lavages.

En outre la présence, dans ces œufs, d'un corps que nous allons décrire, rendait cette séparation plus difficile encore.

De l'Ichthuline.

Nous venons de dire qu'une petite quantité d'eau mélangée au liquide obtenu en écrasant des œufs de carpe, en voie de formation, faisait disparaître les grains rectangulaires d'ichthidine, et que l'on produirait un liquide transparent, ne tenant plus en suspension que quelques gouttes de graisse. En augmentant la proportion d'eau, on voit aussitôt se précipiter un nouveau corps qui jusqu'alors était resté en dissolution dans la liqueur albumineuse, et qui, se rassemblant par l'agitation, se sépare sous la forme d'une masse sirupeuse, filante, insoluble dans l'eau.

Ce corps se retrouve dans un grand nombre d'œufs de poisson que nous avons toujours examinés pendant qu'ils étaient à l'état d'ovules, retenus dans les lamelles ovariennes. Nous avons constaté sa présence dans le bars (*La-*

Digitized by Google

brax lupus), le muge à grosses lèvres (*Mugil chelo,* Nob.), le maquereau (*Scomber scombrus*, Lin.), le turbot (*Pleuronectes maximus*, Lin.), la sole commune (*Pleuronectes solea*, Lin.), la sole bretonne (*Sole armorica*, Val.)

Nous avons aussi retrouvé ce corps en grande abondance dans les œufs du saumon, déjà détachés des lames ovariennes, et tombés dans la cavité abdominale.

Il nous a donc paru important de l'étudier avec soin, et d'en déterminer la composition.

Nous lui avons donné le nom d'ICHTHULINE.

Le liquide obtenu en pressant des œufs de saumon dans dans un linge est traité par l'eau distillée; l'albumine se dissout, et l'on détermine alors la précipitation de l'ichthuline. Cette substance est ensuite purifiée par des traitements à l'alcool et à l'éther.

Au moment de sa précipitation, l'ichthuline et visqueuse, et ressemble à du gluten. Mais l'action de l'alcool et de l'éther lui fait perdre sa viscosité, et elle devient alors solide et pulvérulente.

L'ichthuline, qui, par ses propriétés physiques, s'éloigne sous tous les rapports de l'ichthine, s'en rapproche beaucoup par ses caractères chimiques. Elle est, comme cette dernière, soluble dans les acides acétique et phosphorique; elle se dissout aussi dans l'acide chlorhydrique sans produire de coloration violette.

Sa composition est la suivante.

Digitized by Google

I.	
Matière.....	0,283
Eau.....	0,205
Acide carbonique..	0,545

Dosage de l'azote.

Matière.....	0,338
Azote.....	0,05145

Centièmes.

Carbone.....	52,5
Hydrogène.....	8,0
Azote.....	15,2
Phosphore.....	0,6
Soufre.....	1,0
Oxygène.....	22,7

II.	
Matière.....	0,253
Eau.....	0,190
Acide carbonique...	0,495

Centièmes.

Carbone.....	53,3
Hydrogène.....	8,3

Ces analyses prouvent que l'ichthuline s'éloigne par sa composition de l'ichthine; elle se rapproche, au contraire, de l'albumine, et contient comme elle du soufre et du phosphore.

Il résulte des faits que nous venons d'exposer, que les œufs, encore peu développés, des poissons de la famille des Cyprinoïdes contiennent, avec une substance soluble, l'ichthidine, un liquide fortement albumineux tenant en dissolution des sels minéraux, de l'ichthuline, et en suspension de la graisse phosphorée.

Après avoir obtenu ces résultats, il nous a paru intéressant de comparer à des œufs qui se trouvent encore à l'état d'ovules des œufs de ces mêmes espèces, complétement formés, détachés des lamelles ovariennes et libres dans l'oviducte.

Cet examen nous a conduits à constater ce fait physiologique très-important : c'est que la composition des œufs éprouve, avec l'âge de leur développement, des modifications profondes, même avant la ponte, et pendant le séjour qu'ils font dans l'oviducte.

Digitized by Google

Il résulte, en effet, de nos analyses, que les œufs de carpe entièrement formés ne contiennent plus de traces d'ichthidine, que l'ichthuline disparaît aussi peu à peu, et que, quand ils sont devenus tout à fait transparents, ces œufs sont formés uniquement par une liqueur fortement albumineuse qui tient en suspension de la graisse phosphorée.

L'examen des œufs de carpe, encore jeunes, nous a aussi démontré que, pour étudier les œufs de ces Cyprinoïdes, il faut se garder de les mettre en contact avec l'eau; qui dissout souvent des corps dont il est important de constater la présence, et qui, dans d'autres cas, précipite des substances, telles que l'ichthuline, qui étaient d'abord en dissolution.

Des œufs mûrs de Muge, de Truite, de Brochet, de Merlan, de Plie, de Sole, de Barbue.

Nous avons trouvé dans l'ovaire de la plie et du brochet et chez les autres espèces indiquées ci-dessus, des œufs tout à fait mûrs, ne contenant à aucune époque de leur développement de l'ichthidine, mais très-riches en ichthuline dans leur premier âge. Détachés de l'ovaire et libres dans l'oviducte, ils ne nous ont plus montré la moindre trace d'ichthuline; ils sont formés alors par un liquide fortement albumineux, contenant une quantité considérable de graisse phosphorée.

Cette quantité d'albumine explique pourquoi les œufs de tous ces poissons deviennent durs par la cuisson.

Des œufs de Saumon.

Les œufs de saumon ne contiennent pas de grains rectangulaires solubles dans l'eau. Ceux que nous avons examinés étaient libres dans la cavité abdominale, ils présentaient beaucoup d'ichthuline et fort peu d'albumine. Leur couleur jaune-rougeâtre est due à la présence d'une quantité considérable d'huile phosphorée.

Soumis à la cuisson, ils deviennent opaques, mais en

Digitized by Google

restant toujours mous, même en les tenant longtemps dans l'eau bouillante. Cela se comprend, puisqu'ils n'ont qu'une quantité très-faible d'albumine. Leur opacité est causée par l'eau introduite dans leur intérieur qui détermine alors la précipitation de l'ichthuline.

Des œufs de l'Anguille.

Les œufs ou plutôt les ovules de l'anguille, pris dans les poissons conservés dans les viviers, sont beaucoup trop petits pour que nous ayons pu faire des recherches étendues sur ces curieux produits des organes de la génération. Nous avons pu toutefois nous assurer qu'ils contiennent peut-être encore plus de graisse que les œufs des saumons, et ils ne paraissent pas avoir plus d'albumine, car ils ne durcissent pas par l'ébullition. Nous n'avons pu y voir la moindre trace de l'ichthidine. Nos recherches donnent un moyen très-simple d'observer les œufs de l'anguille. Il suffit de faire bouillir pendant quelques minutes une des lamelles ovariennes; alors les œufs se gonflent sans se durcir, les membranes distendues deviennent plus apparentes, et, avec un grossissement suffisant, on voit aisément ces ovules quand ils ont à peine 1 ou 2 centièmes de millimètre.

Si, comme nous n'en doutons pas, nos observations ultérieures confirment celles que nous publions aujourd'hui, nous donnerons alors un moyen facile, certain, de s'assurer si la femelle a conservé ses œufs assez longtemps dans son oviducte pour les compléter, et s'ils sont bons à être fécondés. Il suffira d'en faire sortir quelques-uns du ventre du poisson, d'en écraser un sur une lame de verre, et d'y ajouter un peu d'eau. S'il ne se fait pas de précipité d'ichthuline, l'œuf est mûr, car il ne contient que de l'albumine et de la graisse phosphorée. S'il se fait un précipité d'ichthuline, il faudrait remettre le poisson dans l'eau, et attendre encore quelque temps avant de procéder à la fécondation.

Digitized by Google

Nous indiquons ce moyen comme le plus certain, aux personnes qui veulent tenter des fécondations artificielles.

Après avoir constaté que les œufs de poissons contiennent des substances insolubles dans l'eau, l'ichthine et l'ichthuline, qui ont toutes deux des propriétés différentes de la vitelline des oiseaux, nous avons recherché si l'albumine des œufs de poissons est la même que celle des œufs d'oiseaux.

Quoique nous réservions l'exposé détaillé de cet examen pour un prochain travail, nous sommes déjà en mesure d'établir que ces deux substances albumineuses présentent souvent dans leurs propriétés des différences notables.

En effet, l'albumine des œufs de certains poissons se dissout sans aucune coloration dans l'acide chlorhydrique, et elle commence à se coaguler vers 45 degrés; tandis que l'albumine des œufs d'oiseaux se dissout, comme l'on sait, dans l'acide chlorhydrique, en donnant au liquide une couleur bleue-violacée, et elle ne se coagule que vers 63 degrés.

OEufs de Tortue.

Nous avons examiné les œufs de deux espèces de Reptiles chéloniens appartenant à deux genres distincts. Les uns provenaient d'une ponte d'une tortue de terre d'Alger, que M. Duméril a nommée *Testudo mauritanica*. Cette femelle vit depuis plusieurs années, en France, chez un habitant de Granville.

La seconde espèce est la tortue d'eau douce d'Europe, la bourbeuse de Daubenton et de Lacépède, et que M. Duméril a nommée *Cistudo europæa*.

Quoique ces deux espèces de Chéloniens habitent des contrées et des milieux différents, la ressemblance dans la constitution et la composition des liquides de leurs œufs est bien digne de remarque; mais il y a encore une similitude à laquelle on est loin de s'attendre : c'est que ces œufs ont une grande analogie avec ceux des poissons cartilagineux. Ils sont formés d'un blanc gélatineux, peu abondant,

Digitized by Google

à peine albumineux, enfermé dans les cellules des grandes membranes transparentes. Le jaune, très-riche en albumine, contient en outre une quantité considérable d'huile phosphorée, et, de plus, des grains particuliers constituant un nouveau principe immédiat. Il n'existe pas dans ces œufs une matière précipitable par l'eau analogue à l'ichthuline. En traitant par l'eau leur vitellus, on voit nager à la surface du liquide l'huile jaunâtre de l'œuf, et se précipiter des petits grains blancs. L'eau retient en dissolution l'albumine et les sels.

Les granules peuvent être facilement purifiés par des lavages à l'eau, à l'alcool et à l'éther. On obtient par ces procédés une matière qui présente, dans ce grand état de pureté, une certaine analogie avec l'ichthine, mais qui s'en éloigne par des caractères qui ne permettent pas de la confondre avec les substances trouvées dans les œufs de poissons.

Nous avons donné à ce nouveau corps le nom d'ÉMYDINE.

De l'Émydine.

Les granules de cette substance sont arrondis ou un peu ovoïdes, et couverts de petites rugosités. Ils sont blancs, transparents, plus durs et plus denses que les grains d'ichthine. Les plus gros grains d'émydine extraits des œufs de tortue mauritanique (*Testudo mauritanica*) ont 10 centièmes de millimètre. Ils paraissent enveloppés dans une membrane très-mince, qui a l'air de se déchirer quand on la comprime sous le microscope, ou qui laisse voir, par sa transparence, une forme de noyau souvent de forme hexaèdre. Ce noyau lui-même grossit peu à peu, ses angles s'effacent, et il finit par devenir sphérique. D'autres granules se crèvent en se boursouflant. On en voit de toutes grandeurs, depuis 1 centième de millimètre jusqu'à la plus forte dimension.

Les granules de l'émyde (*Cistudo europæa*, Dum.) sont

Digitized by Google

plus petits que ceux de la tortue de terre, car les plus gros ne nous ont pas paru dépasser 6 centièmes de millimètre, et ils semblent, en général, être plus sphériques que ceux de l'espèce précédente. Quoique résistants sous le pilon, nous en avons brisé, et nous les avons vus se fendre en fragment de sphère de la circonférence au centre.

La potasse très-étendue dissout immédiatement l'émydine, tandis qu'elle n'agit que lentement sur l'ichthine. L'acide acétique, qui dissout, comme on le sait, avec la plus grande facilité l'ichthine, gonfle simplement les grains d'émyline, mais ne les dissout pas. Ces caractères nous paraissent établir des différences très-nettes entre l'ichthine et l'émydine. Ses granules se dissolvent dans l'acide chlorhydrique bouillant, sans communiquer au liquide de coloration violette; cette action prouve que l'émydine n'est pas la vitelline des œufs d'oiseaux.

L'émydine soumise à l'analyse a présenté la composition suivante :

Matière.....	0,313
Eau.....	0,210
Acide carbonique...	0,568

Dosage de l'azote.

Matière.....	0,370
Azote.....	0,0579

En centièmes.

Carbone.....	49,4
Hydrogène.....	7,4
Azote.....	15,6
Oxyg. et phosphore.	27,6

Cette substance nous paraît être isomérique avec l'ichthine.

Les grains d'émydine laissent, par l'incinération, un résidu de sels calcaires qui ne dépasse jamais 1 centième.

Digitized by Google

Nous avons aussi constaté que les œufs de notre *Testudo mauritanica* provenant d'une même couvée présentent entre eux des différences assez notables.

Le jaune de certains œufs ne contenait pas de granules d'émydine, mais alors le blanc, au lieu d'être transparent et incolore, avait une légère teinte jaunâtre. On y voyait, sous le microscope, de petits granules de forme irrégulière qui ne paraissaient pas sans analogie avec les granules d'émydine du vitellus.

Des œufs de Lézard.

Il résulte de nos observations sur les œufs du lézard vert piqueté, et sur ceux du lézard des souches, que la composition de leur vitellus présente une certaine ressemblance avec celle du jaune d'oiseaux. Nous n'y avons pas trouvé de grains d'ichthine ou d'émydine.

Des œufs de Couleuvre.

Nous avons examiné des œufs de la couleuvre à collier et ceux de la couleuvre d'Esculape. Nos analyses sont venues confirmer celles de MM. Martin Saint-Ange et Baudrimont. Nous avons reconnu que le vitellus de ces œufs est à peine entouré d'une couche très-mince d'albumine. Le jaune est formé d'albumine et de graisse phosphorée, et il paraît laisser précipiter de la vitelline lorsqu'on l'étend d'eau.

Des œufs de Vipère.

Les œufs de la vipère commune diffèrent sous plusieurs rapports de ceux de la couleuvre.

Ils contiennent un blanc qui est semblable à celui des œufs de la raie, d'une consistance gélatineuse; il est formé par des membranes élastiques, hyaloïdes, retenant une eau légèrement albumineuse.

Le jaune d'œuf de vipère se présente, comme celui de la

Digitized by Google

couleuvre, sous l'aspect d'un liquide très-albumineux, tenant en suspension une quantité considérable de graisse; lorsqu'on met ce jaune en contact avec l'eau, il se produit un phénomène que nous n'avons remarqué sur aucune espèce d'œufs. Le liquide, d'abord assez fluide, s'épaissit peu à peu, et devient bientôt complétement gélatineux. Ce changement d'état dans la liqueur est dû à un corps semblable à la vitelline qui, se trouvant d'abord en dissolution dans l'albumine, devient insoluble par l'action lente de l'eau, et finit par la faire prendre en gelée.

Ce corps est-il de la vitelline? Nous n'avons pu résoudre cette intéressante question l'an dernier; nous espérons bien le faire cette année, si nous sommes assez heureux pour nous procurer une quantité suffisante d'œufs de vipère. Nous continuerons aussi d'étudier, pendant la saison actuelle, les œufs des Sauriens et des Ophidiens.

Des œufs de Batraciens.

Les nombreuses observations faites sur les œufs de Batraciens n'ont encore rien appris sur la nature des substances qui les constituent.

La matière gélatineuse des œufs de grenouille est formée d'un tissu de membranes hyaloïdes, contenant de l'eau absorbée peu après la ponte. Elle se modifie par la cuisson, devient légèrement opaline, et le vitellus durcit, ce qui donne la preuve de l'existence de l'albumine.

Le vitellus noirci par un pigment noir propre à ces œufs et colorant la membrane vitelline excessivement mince, mais reconnaissable par le desséchement, contient dans son liquide une très-petite quantité de matière grasse réunie en gouttelettes transparentes, une matière qui se présente sous le microscope comme un pointillé noir d'une extrême ténuité, et enfin une abondance de granules vitellins, d'une excessive petitesse, transparents, de forme variable, mais plus communément arrondis, insolubles dans l'eau et solu-

Digitized by Google

bles dans l'acide acétique. Nous avons répété plusieurs fois cette expérience, afin d'être certains de ce caractère.

Les œufs des tritons offrent la même composition. La matière blanche extérieure est semblable à celle de l'œuf de la grenouille.

Le vitellus citron ou vert, suivant les individus, contient de la graisse et un nombre considérable de granules vitellins arrondis, que nous avons étudiés dans l'œuf pris dans l'oviducte près d'être pondu, et dans l'ovule encore renfermé dans l'ovaire. L'examen de ces derniers nous a prouvé ce fait remarquable, que les granules vitellins grossissent avec l'âge de leur formation. Ils sont infiniment plus petits dans l'ovule que dans le vitellus de l'œuf. Ces granules sont aussi insolubles dans l'eau et solubles dans l'acide acétique. L'œuf devient dur par la cuisson dans l'eau bouillante; il contient donc aussi de l'albumine, comme celui de la grenouille.

Nous avons dit précédemment que MM. Martin Saint-Ange et Baudrimont ont vu les granules de la grenouille; ils en ont même donné la figure.

M. Rud. Wirchow a aussi publié des observations précises sur les granules des œufs de grenouille, de crapaud et de triton (*Zeitschrift fur wissenschaftliche zoologie*, par MM. Siebold et Kölliker, tome IV, 2e partie, page 236; 1852).

Les caractères que nous venons d'exposer nous conduisent à conclure que les granules contenus dans ces œufs sont de la nature de l'ichthine, et ressemblent par conséquent à des œufs de raie et de squale. Nous pouvons donc établir ce fait physiologique important, à savoir que les Batraciens devant subir, par la conséquence de leur métamorphose, une première condition d'existence semblable à celle des poissons, pondent des œufs dont la composition a la plus grande affinité avec ceux des poissons. Cette similitude se soutient même jusque dans les ovules, car nous

Digitized by Google

avons déjà remarqué que les granules de l'ichthine de raie sont plus petits dans les ovules que dans le jaune de l'œuf de ces poissons.

Nous y démontrons, en effet, une même composition du blanc entourant le vitellus, et dans celui-ci la présence de l'ichthine, ce principe immédiat nouveau abondant dans l'œuf des cartilagineux.

Des œufs de Crustacés et de la matière colorante verte des Crustacés.

Les écrevisses de nos eaux douces et les homards nous ont fourni les œufs nécessaires à nos recherches.

Les homards portant de quinze à vingt mille œufs sous les feuilles de leur queue, sont les plus commodes pour le genre de recherches que nous avons entreprises.

Les œufs ne contiennent pas d'ichthuline ; on n'y trouve aucune espèce de granules. Ils sont essentiellement formés par une liqueur albumineuse et saline, tenant en suspension des corps gras.

L'albumine des œufs de crustacés nous paraît différer, sous quelques rapports, de l'albumine des autres œufs. Sa coagulation ne commence que vers 74 degrés.

Nous avons aussi étudié la langouste. Les œufs de ce crustacé sont très-petits, à peine gros comme la graine du pavot. Nous en avons compté environ cent trente mille sous les feuillets de la queue.

L'étude des œufs du homard nous a permis d'obtenir à l'état de pureté la matière si curieuse qui prend une coloration rouge lorsqu'on soumet à l'action de la chaleur le test des Crustacés. Jusqu'alors elle n'avait pu être convenablement étudiée, parce que les dissolvants la présentaient toujours à l'état de mélange avec des corps gras, et qu'en outre les dissolvants, tels que l'éther ou l'alcool, la donnent à l'état rouge, c'est-à-dire déjà modifiée: elle existe dissoute dans l'albumine des œufs de crustacés; en chauf-

Digitized by Google

fant le liquide, on coagule la matière albumineuse, qui entraîne avec elle, à la manière d'une laque, la matière colorante, qui est alors d'un très-beau rouge. Le précipité est repris par l'alcool, qui dissout la substance colorante, et laisse l'albumine à l'état insoluble.

La méthode suivante nous a permis d'obtenir la substance colorante telle qu'elle existe dans les Crustacés, et présentant encore sa couleur verte.

La matière colorante verte des Crustacés est soluble dans l'albumine; aussi, lorsqu'on écrase des œufs de homard, le liquide albumineux qui passe à la filtration est fortement coloré en vert, et tient en dissolution la matière colorante. Les méthodes ordinaires, telles que l'action de la chaleur, celle des dissolvants neutres, la dessiccation, etc., que l'on appliquerait à l'extraction de cette substance singulière, la présenteraient déjà modifiée. En effet, lorsqu'on emploie l'alcool ou tout autre agent, la substance qui était d'abord verte, devient immédiatement rouge; mais, par une circonstance inattendue et très-heureuse pour notre travail, le seul liquide qui n'altère pas cette matière colorante, c'est-à-dire l'eau, nous a permis de l'obtenir à l'état de pureté; en effet, lorsqu'on étend d'une grande quantité d'eau la liqueur albumineuse verte dont nous avons parlé plus haut, la matière colorante se précipite, et peut être facilement recueillie sur un filtre.

Nous avons pu alors constater les propriétés suivantes, qui, nous le pensons, sont de nature à intéresser les savants.

Cette substance est verte, résineuse et incristallisable; elle se modifie et devient rouge dans des circonstances bien curieuses. Pour opérer cette transformation, il suffit de la soumettre à une dessiccation même à la température ordinaire.

Les sels qui ont de l'affinité pour l'eau peuvent transformer la matière colorante verte des Crustacés en substance

Digitized by Google

rouge : les sels, au contraire, qui ne se combinent pas avec l'eau, n'exercent aucune action sur cette singulière matière colorante.

L'action du vide peut opérer rapidement la coloration rouge. Le simple frottement fait rougir immédiatement la substance verte. L'alcool, l'éther, les acides opèrent le changement. Il n'existe pas comme on le voit, dans l'organisation végétale ou animale, de substances colorantes comparables à celle des Crustacés, et se modifiant avec autant de facilité par l'action des agents les plus simples. Nous tenions à constater si cette substance présente les mêmes caractères lorsqu'elle est encore fixée sur le test des Crustacés; il est résulté de nos expériences que, dans ce cas, la substance verte se comporte comme lorsqu'elle est isolée. Ainsi un test d'écrevisse, qui présente la coloration verte, devient instantanément rouge lorsqu'on le frotte avec un corps dur. Ce n'est pas la chaleur développée par le frottement qui opère cette modification singulière, car on l'a constatée lorsque le test est encore très-humide, et, en outre, on la voit se manifester rapidement sur un test d'écrevisse placé sous le récipient d'une machine pneumatique et soumis à l'action du vide.

Le changement de couleur par le frottement explique comment les anatomistes qui ont recherché la cause de la coloration des écrevisses par la cuisson ont toujours vu de la matière rouge sous la couche, mince comme l'épiderme, qu'ils enlevaient pour observer le test au microscope. Le seul frottement sur les utricules, atteintes par le scalpel, suffit pour faire rougir la couleur verte.

Nous sommes heureux d'avoir pu isoler ainsi une des matières colorantes les plus curieuses produites par l'organisation animale ; nous réservons pour un autre travail l'analyse élémentaire de cette substance que nous n'avons pas encore isolée dans un état de pureté absolue.

Digitized by Google

Des œufs d'Arachnides et d'Insectes.

Nous avons soumis à l'analyse des œufs de différentes espèces d'araignées : ils contiennent de l'albumine, des corps gras et une substance précipitant par l'eau.

Les œufs de fourmi nous ont présenté les mêmes résultats.

Ces recherches vont être continuées pendant la saison dans laquelle nous entrons.

Des œufs de Mollusques.

L'analyse des œufs de colimaçons, que nous compléterons également dans la saison prochaine, semble nous démontrer que les œufs des Mollusques s'éloignent complétement, par leur composition, de ceux des autres animaux.

Ceux que nous nous sommes procurés ne nous ont présenté aucune trace de graisse ; ils étaient exclusivement formés par des membranes hyaloïdes contenant un liquide visqueux incolore. Ce liquide contient en dissolution une substance organique azotée qui n'est pas de l'albumine, car elle ne se coagule pas par la chaleur. Elle est précipitée par l'acide acétique, et elle se dissout dans l'acide chlorhydrique sans produire de coloration violette.

Nous venons d'exposer les résultats de nos recherches sur les œufs d'animaux divers, appartenant à toutes les grandes classes des ovipares. En les résumant, essayons de faire ressortir par quelques propositions générales, les conséquences les plus importantes qui nous paraissent résulter de ce premier travail.

Nous avons démontré :

1°. Qu'il existe des différences fondamentales entre la composition des œufs d'animaux et que, sous ce nom collectif d'*œuf*, désignant le produit de l'appareil ovarien destiné à concourir à la perpétuité de l'espèce, on com-

Digitized by Google

prend des corps très-complexes, les plus différents les uns des autres ;

2°. Que, parmi les animaux vertébrés, les œufs d'Oiseaux, de Reptiles, de Poissons, présentent dans leur composition des différences que l'analyse la plus simple ne saurait méconnaître, et cependant que les œufs des Sauriens et Ophidiens ont une grande analogie avec ceux des Oiseaux, tandis que les œufs des Batraciens se rapprochent de ceux des Poissons cartilagineux ;

3°. Que les œufs d'Arachnides et d'Insectes s'éloignent complétement, quant à leur composition, des œufs des autres animaux ;

4°. Que ceux des Crustacés, organisés pour éclore dans l'eau, ne ressemblent nullement à aucun de ceux des Poissons ou des autres vertébrés amphibies ;

5°. Qu'il en est de même des œufs des Mollusques ;

6°. Que ces différences ne correspondent pas seulement aux classes ou aux ordres, qu'elles s'étendent jusqu'aux familles naturelles sans même s'y arrêter, puisque nous avons prouvé qu'un œuf de poisson cartilagineux n'a pas la même composition qu'un œuf de poisson osseux ; mais, de plus, qu'un œuf de carpe est très-différent d'un œuf de saumon ; qu'un œuf d'Ophidien, tel qu'une couleuvre, ne contient pas les mêmes principes que ceux des Chéloniens ;

7°. Que, si la composition des différents principes immédiats est la même dans des espèces très-voisines, la forme et la grandeur des granules vitellins varient d'une manière assez appréciable pour pouvoir être reconnue et assignée à chaque espèce ;

8°. Que les substances albumineuses provenant des œufs d'Oiseaux, de Reptiles, de Poissons, de Crustacés, présentent dans leurs propriétés chimiques et dans leur point de coagulation, des différences qui permettent de supposer que ces corps constituent des principes immédiats différents ;

9°. Qu'un œuf change de nature, que ses liquides se modifient considérablement aux différentes époques de sa

Digitized by Google

formation, en se détachant de l'ovaire et en séjournant dans l'oviducte avant d'être pondu;

10°. Après avoir constaté, dans les œufs des différents animaux, la présence de plusieurs principes immédiats nouveaux, l'ichthine, l'ichthuline, l'ichthidine, l'émydine, et rapprochant ces résultats que ceux de MM. Dumas et Cahours ont obtenus dans l'analyse des œufs de poule, nous n'hésitons pas de proposer aux savants d'admettre, dans les œufs, l'existence d'une classe nouvelle de corps organiques comprenant des principes immédiats que nous désignerons désormais sous le nom de *substances vitellines* ou de *corps vitellins*.

Muscles.

Nos recherches sur la composition des œufs nous avaient déjà démontré qu'une étude comparée des parties similaires de l'organisation, comprenant les différentes classes du règne animal, présentait toujours un grand intérêt zoologique et chimique.

Mettant à profit une association qui nous permet d'aborder les questions qui sont du ressort de la zoologie et de la chimie, nous nous sommes proposé d'étendre à la fibre musculaire le travail que nous avions précédemment entrepris sur les œufs, c'est-à-dire de faire ressortir, par une étude comparée, les différences qu'offrent les muscles dans leur composition chimique.

Un examen général entrepris sur toute la série animale devait nous donner d'abord des notions assez précises sur la nature des principes immédiats qui se trouvent dans la fibre musculaire et sur les procédés analytiques qui nous permettraient de les isoler.

Cette étude d'ensemble nous a permis de constater plusieurs faits importants que nous consignons dans ce premier Mémoire.

Digitized by Google

La fibre musculaire des animaux vertébrés, que nous avons d'abord examinée, a toujours été séparée avec le plus grand soin, par les procédés anatomiques, des fibres blanches aponévrotiques ou tendineuses, des filets nerveux, des principaux vaisseaux sanguins, et de la graisse qu'elle contient en quantité considérable.

Lorsque l'on analyse les muscles des vertébrés, le principe immédiat qui se présente en premier lieu est la *créatine*, dont on doit, comme on le sait, la découverte importante à M. Chevreul.

Viennent ensuite l'acide *inosique* et la *créatinine*, dont les caractères ont été donnés avec tant de netteté par M. Liebig.

Dans cette partie de nos recherches, nous ne pouvions que confirmer les travaux des savants illustres que nous venons de citer. Nous dirons cependant que la créatinine nous a paru beaucoup plus abondante dans l'économie animale qu'on ne le pense généralement; nous avons constaté sa présence dans la fibre musculaire de presque tous les vertébrés; elle se trouve souvent à l'état de liberté et s'annonçant alors par une réaction alcaline très-marquée; souvent aussi nous l'avons rencontrée en combinaison avec l'acide phosphorique.

Le corps qui donne de l'acidité aux muscles de tous les vertébrés devait ensuite attirer notre attention; il nous a paru intéressant d'isoler ce principe et de le soumettre à l'analyse.

Il est résulté de nos recherches à cet égard que si dans quelques cas l'acidité des muscles est due à l'acide lactique, le corps qui rend la fibre musculaire fortement acide est ordinairement le phosphate acide de potasse qui, d'après nos analyses, a pour formule

$$KO, 2HO, PhO^5.$$

Nous avons extrait ce sel à l'état cristallisé en traitant les

Digitized by Google

muscles par l'alcool faible et en évaporant la liqueur jusqu'à consistance sirupeuse.

En déterminant la proportion de ce sel dans les muscles des différents animaux, nous avons reconnu qu'elle paraissait être liée en quelque sorte à la formation du système osseux ; nous avons en effet trouvé toujours ce sel en abondance chez les animaux dont les os sont très-développés, et en quantité très-faible chez les animaux articulés ou chez les Mollusques. On comprend du reste le rôle que ce sel peut jouer dans la formation des os, car nous avons constaté par des expériences directes qu'en réagissant sur le carbonate de chaux le phosphate acide de potasse, extrait des muscles, peut donner naissance au phosphate de chaux basique, qui entre, comme on le sait, en si grande quantité dans la constitution de la substance osseuse.

Ce phosphate acide de potasse n'est peut-être pas sans influence sur la production d'un matière grasse phosphorée qui existe dans les muscles, et dont il sera question plus loin ; nous pensons donc que, sous tous les rapports, il mérite l'attention des physiologistes.

Les muscles des vertébrés sont imprégnés d'une quantité considérable de corps gras formés en proportion variable d'oléine, de margarine et de stéarine. A côté de ces corps gras neutres, on en trouve constamment un autre qui s'éloigne des matières grasses proprement dites par l'ensemble de ses propriétés, et qui présente une certaine analogie avec la graisse cérébrale.

Nous avons fait une étude assez complète de cette matière intéressante.

Nous l'extrayons avec facilité, en traitant les muscles par de l'alcool faible qui la dissout sans agir sur les autres corps gras.

Ce liquide, soumis à l'évaporation, donne une substance visqueuse de couleur ambrée, qui se dissout incomplétement dans l'eau : traitée par l'acide sulfurique, elle se dé-

Digitized by Google

compose à la manière d'un savon, en donnant du sulfate de soude et un acide plus lourd que l'eau. Cet acide est azoté et phosphoré; soumis à l'analyse, il a présenté exactement la composition du corps que l'un de nous a extrait de la graisse cérébrale et qu'il a nommé *acide oléophosphorique*. Ainsi la graisse phosphorée qui existe dans les muscles est identique avec celle qui se trouve en grande abondance dans le cerveau et est produite, comme cette dernière, par la combinaison de la soude avec l'acide oléophosphorique. Cette substance se trouve, on peut le dire aujourd'hui, dans presque toutes les parties de l'organisation animale; nous avons constaté que sa proportion dans le tissu musculaire augmente avec l'âge des animaux, et qu'elle varie également avec les diverses espèces de vertébrés.

Ainsi les poissons à chair blanche et légère, comme le merlan, la limande, le carrelet, n'en contiennent qu'une faible proportion; tandis que les poissons dont la chair est compacte, d'une saveur très-marquée, d'une digestion souvent difficile, comme le maquereau, le hareng, la truite et surtout le saumon, en présentent des quantités considérables. C'est du reste ce corps phosphoré qui, en se décomposant incomplétement par l'action de la chaleur, communique au poisson grillé une saveur caractéristique.

En recherchant cette substance dans les muscles des poissons, nous avons été conduit naturellement à étudier le corps rouge qui colore les muscles du saumon et qui, dans les truites et quelques autres poissons, produit le *saumonage*. Le changement de couleur si remarquable qu'éprouvent les muscles de plusieurs poissons est connexe avec le phénomène de la reproduction. Ainsi le saumon a la chair rouge pendant toute l'année, mais ses muscles deviennent sensiblement plus pâles au moment de la ponte. Cette décoloration est plus évidente encore dans les truites: on sait en effet qu'au moment du frai la chair de ces poissons devient complétement blanche.

Digitized by Google

Comme les individus ne frayent pas tous au même moment, que les femelles se saumonent plus fortement et restent plus longtemps saumonées que les mâles, on comprend que dans un même cours d'eau on prenne souvent des truites blanches et des truites saumonées.

Ces remarques démontrent encore que la truite saumonée n'est pas pas un métis de truite et de saumon ; la fécondation d'un de ces deux poissons par l'autre pourrait difficilement se comprendre, car le saumon fraye en juillet et rarement en août, tandis que la truite fraye en décembre.

La matière colorante des muscles du saumon avait attiré déjà l'attention de sir Humphry Davy ; on trouve dans un ouvrage de ce célèbre chimiste, le *Salmonia*, que la chair du saumon peut être décolorée par l'éther.

Jusqu'à présent cette matière colorante n'avait pas été isolée ; c'est cette lacune que nous avons voulu remplir. Il est résulté de nos recherches que la matière colorante du saumon est de nature grasse, qu'elle présente les caractères d'un acide faible que nous avons nommé *acide salmonique*, et qu'elle se trouve en dissolution dans une huile neutre.

Pour isoler l'acide salmonique, nous avons recours à la méthode suivante : l'huile rouge que l'on extrait avec facilité des muscles de saumon, par l'action de la presse, est agitée à froid avec de l'alcool qui a été rendu faiblement ammoniacal ; l'huile se décolore alors complétement et abandonne à l'alcool sa matière colorante, que l'on extrait ensuite en décomposant, par un acide, le sel ammoniacal.

L'acide ainsi obtenu est visqueux, rouge et présente tous les caractères d'un acide gras ; celui que l'on retire des truites saumonées est identique avec l'acide qui existe dans les muscles du saumon.

Nous l'avons trouvé en quantité considérable et mélangé à l'acide oléophosphorique dans les œufs de saumon, ce

Digitized by Google

qui rend compte, jusqu'à un certain point, de la décoloration et de la perte de saveur qu'éprouve la chair du saumon au moment de la ponte.

Le saumon bécard (*Salmo hamatus*, Val.) ne contient pas autant d'acides salmonique et oléophosphorique que le saumon commun (*Salmo salmo*, Val.) ; les muscles des poissons peuvent donc, dans les espèces les plus voisines, offrir des différences notables quant à leur composition.

Il était intéressant de comparer les muscles des Crustacés à ceux des Poissons.

Pour opérer sur la chair musculaire des Crustacés, pure et sans mélange d'autres organes, nous avons pris la masse des faisceaux musculaires de la queue, en ayant le soin d'enlever l'extrémité du canal intestinal et le cordon nerveux qui le suit.

Les muscles ainsi préparés ont été soumis à l'action des divers dissolvants et surtout de l'alcool et de l'éther. Ils nous ont paru plus simples dans leur composition que ceux des Mammifères, et ont présenté une certaine analogie avec les muscles des Poissons.

Ainsi le phosphate acide de potasse, qui se trouvait en si grande abondance dans les muscles des Mammifères, manque presque complétement chez les Crustacés ; l'acide oléophosphorique y existe, au contraire, en proportion assez forte comme dans les muscles des Poissons. Nous avons également extrait de la créatine et de la créatinine des muscles de plusieurs espèces de Crustacés.

Pour compléter cette étude générale des muscles des différents animaux, il nous restait à examiner les muscles des Mollusques, qui devaient, dans leur analyse, nous présenter un fait bien remarquable et tout à fait imprévu.

Afin de rendre comparables ces résultats analytiques avec ceux que nous avons constatés chez les autres animaux, nous avons pris les plus grands soins dans la préparation

Digitized by Google

du tissu musculaire des Mollusques destiné à nos expériences. Ainsi, opérant sur le grand muscle du manteau des Céphalopodes, après avoir enlevé l'os de la sèche et la plume du calmar, nous avons mis de côté toutes les membranes qui tapissent la cavité renfermant les sécrétions, et nous avons ôté les cartilages qui règlent sur les tubercules correspondants du corps les mouvements de ces grands muscles. Chez les Acéphales nous n'avons pris que les grands adducteurs des valves; en un mot, évitant tous les produits de sécrétions et tous les organes de composition si complexe qui abondent chez ces animaux que l'on désigne trop souvent sous le nom d'*êtres simples*, nos analyses ont porté sur la fibre musculaire pure, dans les Mollusques de la classe des Céphalopodes jusqu'à celle des Acéphales. Ces préparations délicates ont exercé une grande influence sur la netteté des résultats analytiques que nous avons à signaler.

Nous dirons d'abord que les muscles des Mollusques ont présenté une composition beaucoup plus simple que ceux des animaux vertébrés; ils ne contiennent plus de quantités appréciables de phosphate acide de potasse, d'acide oléophosphorique, de créatine et de créatinine : ces principes immédiats sont remplacés par une matière cristalline que nous signalerons ici d'une manière spéciale. Le corps cristallisé dont nous allons parler se retire avec autant de facilité des huîtres que des sèches; on peut dire qu'il caractérise les muscles de ces animaux.

Il est beaucoup plus soluble dans l'eau bouillante que dans l'eau froide; insoluble dans l'alcool et l'éther; il ne se combine ni avec les acides ni avec les bases; il résiste à l'action de l'acide azotique et à celle de l'eau régale. Soumis à l'influence de la chaleur, il donne tous les produits qui résultent de la décomposition des substances organiques azotées, et dégage, en outre de l'acide sulfureux, du sulfite et du sulfate d'ammoniaque.

Digitized by Google

La présence du soufre dans la matière cristalline des Mollusques a été confirmée par l'analyse élémentaire dont nous citons ici les résultats :

C.....	19,5
H.....	5,9
Az.....	10,5
S.....	24,0
O.....	40,1
	100,0

Ces données analytiques et l'ensemble des caractères que nous venons de rappeler, démontraient que la substance des Mollusques était identique avec une matière fort remarquable découverte par Gmelin dans la bile des vertébrés, la *taurine*.

Pour donner à ce fait intéressant un dernier degré de certitude, nous avons prié M. de Senarmont de déterminer la forme cristalline du corps que nous avions retiré des Mollusques; cette détermination cristallographique est venue également confirmer l'identité de la taurine provenant de la bile avec celle qui existe dans les muscles des huîtres et des sèches.

La présence, dans les muscles des Mollusques, d'une substance qui contient environ 25 pour 100 de soufre et qui jusqu'alors n'avait été trouvée que dans la bile, est un fait physiologique dont l'importance n'échappera à personne; il nous paraît de nature, en appelant l'attention sur la taurine, à modifier les idées qui jusqu'alors avaient été émises sur le rôle physiologique de cette substance intéressante.

La taurine, par la netteté de ses formes cristallines, peut être comparée à l'urée et présente, au point de vue chimique comme au point de vue physiologique, quelque analogie avec cette base d'origine animale.

Elle a été, comme l'urée, produite artificiellement; on sait, en effet, que, d'après M. Strecker, l'iséthionate d'am-

Digitized by Google

moniaque, soumis à l'action de la chaleur, donne naissance à la taurine. On avait jusqu'à présent considéré cette substance comme résultant toujours de la décomposition d'un acide sulfuré contenu dans la bile, et, en la comparant à l'urée, on l'avait envisagée dans l'organisme comme une substance d'élimination.

Nous pensons que les résultats consignés dans ce Mémoire sont de nature à modifier ces opinions; ils démontrent que la taurine ne prend pas toujours naissance dans le foie et qu'elle est peut-être beaucoup plus abondante dans l'organisation animale qu'on ne l'avait pensé jusqu'à présent.

Tels sont les faits principaux relatifs à la composition des muscles que nous nous proposions de faire connaître.

Quoique dans ce premier travail nous n'ayons envisagé qu'une partie des principes immédiats qui existent dans les muscles des animaux, et que nos analyses n'aient porté que sur un petit nombre d'espèces appartenant aux différents groupes de la série animale, nous voyons déjà se confirmer, pour les muscles, un fait général d'une grande importance que nous avions fait ressortir dans nos recherches sur les œufs; c'est que l'analyse chimique, confirmant, en quelque sorte, les principes qui ont servi de base aux classifications zoologiques, constate l'existence de corps différents chez les animaux qui dans leur organisation présentent aussi des différences fondamentales.

NOTE SUR LA TÉTARTOÉDRIE NON SUPERPOSABLE;

PAR M. L. PASTEUR.

Dans mon travail intitulé : *Recherches sur le dimorphisme dans les substances actives — (tétartoédrie)*, inséré dans les *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, tome XLII, j'ai prêté à Mohs et à ses successeurs une opinion erronée que je m'empresse de rectifier.

Digitized by Google

Après avoir découvert (*voyez* le Mémoire que je viens de rappeler) le premier exemple de tétartoédrie non superposable, j'ai cherché dans les auteurs si ce genre de tétartoédrie, très-différent comme je l'ai dit de celui que les cristallographes allemands supposent, par exemple, dans le quartz, n'avait pas été prévu par eux au moins comme une conception abstraite de la géométrie des cristaux; et j'avais cru que Mohs en avait fait mention à propos du solide à quarante-huit faces du système cubique. Mais les quatre solides que considère Mohs et que l'on déduit par deux hémiédries successives du solide à quarante-huit faces ne diffèrent que par leur position. Ils sont deux à deux identiques et superposables.

Il résulte de là que le genre de tétartoédrie que je fais connaître dans mon travail n'avait pas encore été prévu par les cristallographes.

Je crois utile, en terminant cette Note, d'appeler de nouveau l'attention sur les formes remarquables qui sont l'objet de mon Mémoire. On croit généralement que deux polyèdres qui sont composés exactement des mêmes parties, faces, angles et arêtes, sont toujours ou bien identiques ou bien symétriquement inverses. Les formes cristallines que j'ai décrites sont au nombre de quatre, composées des mêmes parties, et aucune n'est superposable à l'une quelconque des trois autres.

Elles indiquent un genre de similitude qui mériterait quelque attention de la part des géomètres. Dans la similitude par symétrie, telle qu'on la définit ordinairement, l'égalité des arêtes entraîne forcément l'égalité des angles dièdres correspondants.

L'erreur de citation que cette Note a pour but de rectifier m'a été indiquée par une publication récente de M. Delafosse (*Comptes rendus de l'Académie*, 1857).

Digitized by Google

MÉMOIRES SUR LA CHIMIE PUBLIÉS A L'ÉTRANGER.

EXTRAITS PAR M. ADOLPHE WURTZ.

Sur la Constitution et la nature chimique des hydrogènes carbonés; par M. H.-L. Buff (1).

Nous extrayons de ce travail les résultats suivants :

Sulfocyanure d'éthylène. — Lorsqu'on fait bouillir une solution alcoolique de sulfocyanure de potassium avec du chlorure ou du bromure d'éthylène, il se forme du sulfocyanure d'éthylène et du chlorure ou du bromure de potassium. Au bout de quelques heures d'ébullition, on distille l'alcool et on traite le résidu par l'eau, qui dissout les sels de potasse; il reste une substance que l'on dissout dans l'alcool bouillant. La solution bouillante décolorée par le charbon laisse déposer par le refroidissement du sulfocyanure d'éthylène, cristallisé en grandes tables rhomboïdales brillantes et friables. La composition de cette substance est représentée par la formule

$$C^2H^4,\ C^2Az^2S^2 \quad (2).$$

Il prend naissance en vertu de la réaction suivante :

$$\underbrace{C^2H^4Cl^2}_{\text{Liqueur des Hollandais.}} + 2\,KCyS = 2\,KCl + \underbrace{C^2H^4Cy^2S^2}_{\text{Sulfocyanure d'éthylène.}}$$

Le sulfocyanure d'éthylène fond à 90 degrés et se solidifie à 83 degrés. Peu soluble dans l'eau froide, il se dissout plus facilement dans l'eau chaude et se sépare du sein de cette solution en aiguilles groupées en faisceaux. Lorsqu'on le chauffe au bain-marie avec de l'acide nitrique étendu,

(1) *Annalen der Chemie und Pharmacie*, tome C, page 219 (nouvelle série, tome XXIV), novembre 1856.

(2) En équivalents de Gerhardt. L'auteur fait remarquer que M. Sonnenschein a décrit le sulfocyanure d'éthyle dans le cahier de juin 1855 du *Journal für praktische Chemie*.

Digitized by Google

jusqu'à ce qu'il ne se dégage plus de vapeurs rouges, on obtient une matière sirupeuse qui finit par cristalliser.

Cette matière est un acide qu'on a purifié en le dissolvant à plusieurs reprises dans l'eau et en évaporant la solution.

Le sel de baryte de cet acide a donné à l'analyse des résultats qui conduisent à la formule

$$(C^2H^4)\,Ba^2S^2O^6.$$

Cette composition est celle du disulfométholate de baryte; d'ailleurs l'identité de la matière obtenue avec ce sel a été reconnue par M. Hofmann.

Recherches sur le Tantale; par M. H. Rose (1).

On peut préparer le tantale métallique en décomposant le fluorure double de tantale et de sodium par le sodium. On introduit 3 parties de fluorure double par couches dans un creuset de fer avec 1 partie de sodium. Au rouge sombre la réaction s'accomplit avec une vive incandescence. On obtient par le refroidissement une masse noire qu'on épuise par l'eau. Il reste une poudre noire qu'on lave à l'eau et finalement à l'alcool très-faible.

Cette poudre noire est du tantale métallique dans un état de pureté imparfaite. Le métal est ordinairement mélangé avec du tantalate acide de soude. Néanmoins il conduit bien l'électricité. Chauffé à l'air, il brûle avec un vif éclat, et en se transformant en acide tantalique. Pour que l'oxydation soit complète et que cet acide soit blanc, il faut remuer le métal avec un fil de platine pendant l'incandescence. Les acides chlorhydrique, sulfurique et nitrique et même l'eau régale ne l'attaquent pas, comme Berzelius l'a déjà remarqué. L'acide fluorhydrique le dissout incomplétement avec dégagement de gaz. Lorsqu'on le traite par un

(1) *Berichte der Berliner Academie*, page 385 (1856), *Annalen der Chemie und Pharmacie*, tome C, page 242 (nouvelle série, tome XXIV, novembre 1856), et *Journal für practische Chemie*, tome LXX, page 233.

Digitized by Google

mélange d'acide fluorhydrique et d'acide nitrique, il se dissout rapidement, à chaud, avec dégagement de vapeurs rouges. Fondu avec du bisulfate de potasse, le tantale métallique se transforme en acide tantalique.

Lorsqu'on chauffe le tantale métallique dans un courant de chlore, il devient incandescent et se convertit en chlorure de tantale qui distille. Il reste comme résidu une quantité plus ou moins considérable de tantalate acide de soude, dont une petite partie est transformée en chlorure de sodium.

Le tantalate de soude est réduit partiellement par la vapeur de phosphore à une haute température. En épuisant le produit de la réaction par l'eau, on obtient une masse noire qui renferme 6 à 7 pour 100 de tantale métallique.

Lorsqu'on réduit l'acide tantalique ou le chlorure de tantale par l'ammoniaque à une haute température, on n'obtient pas de tantale métallique, mais des azotures.

On peut préparer le chlorure de tantale en faisant passer un courant de chlore sur un mélange d'acide tantalique et de charbon chauffé au rouge.

Il est indispensable pour obtenir un produit pur d'opérer sur de l'acide tantalique soigneusement débarrassé d'acide stannique. On y arrive en fondant l'acide impur avec un mélange de soufre et de carbonate de soude.

Les analyses du chlorure de tantale n'ont pas donné des résultats aussi concordants que l'exigent les déterminations des poids atomiques. Ce chlorure solide, volatil, volumineux, difficilement cristallisable, condense un petit excès de chlore qu'un courant d'air sec ne déplace qu'avec peine. D'autre part, il renferme souvent une petite quantité d'acichlorure.

Les expériences les plus concluantes ont donné pour la composition moyenne du chlorure de tantale les nombres suivants :

Tantale.....	81,14
Chlore.....	50,75

Digitized by Google

D'après cela, l'acide tantalique renfermerait :

Tantale.....	81,14
Oxygène.....	18,86

Ces résultats diffèrent notablement de ceux qu'avait obtenus Berzelius, et d'après lesquels l'acide tantalique ne renfermerait que 11,51 pour 100 d'oxygène.

On peut représenter l'acide tantalique par la formule

$$Ta\,O^2$$

qui permet de représenter d'une manière satisfaisante la composition de la plupart des combinaisons du tantale. Si l'on admet cette formule, le poids atomique du tantale devient 860,26 (O = 100).

Le bromure de tantale, préparé comme le chlorure, et débarrassé de l'excès de brome, est une substance jaunâtre.

On peut obtenir une combinaison du tantale avec le soufre en réduisant l'acide tantalique, au rouge blanc, par le sulfure de carbone. Le sulfure de tantale, ainsi préparé, est gris-noir, mais prend l'éclat métallique et la couleur du laiton lorsqu'on le frotte dans un mortier en agate. C'est un bon conducteur de l'électricité. Le chlore ne l'attaque que faiblement à la température ordinaire. Lorsqu'on chauffe, il se forme du chlorure de soufre et du chlorure de tantale volatil, et il reste un résidu noir formé par du sulfure de tantale fortement agrégé. Le sulfure de tantale ne correspond pas, dans sa composition, à l'acide tantalique, mais il renferme probablement 2 équivalents de tantale et 3 équivalents de soufre.

On peut obtenir un sulfure de tantale d'une densité moindre, en réduisant le chlorure de tantale par l'hydrogène sulfuré à une température rouge. On obtient ainsi un sulfure noir qui, frotté dans un mortier en agate, prend l'éclat métallique et la couleur du laiton. Quelquefois on

Digitized by Google

obtient des croûtes cristallines jaunes qui ressemblent assez au sulfure de fer.

Le sulfure de tantale noir conduit bien l'électricité, le chlore l'attaque à la température ordinaire. Sa composition est représentée, comme celle du sulfure précédent, par la formule

$$Ta^2S^3.$$

Recherches sur le Tantale; par M. R. Hermann (1).

Les expériences de M. Hermann sur la composition centésimale du chlorure de tantale et de l'acide tantalique, et sur le poids atomique du tantale, s'accordent parfaitement avec celles de M. H. Rose.

L'auteur admet que l'acide tantalique renferme 2 atomes de métal et 3 atomes d'oxygène. Il obtient un hydrate d'acide tantalique $Ta^2O^3 + 3HO$ en faisant bouillir le sulfate d'acide tantalique avec de la soude. C'est une poudre blanche.

L'acide tantalique se combine avec l'acide sulfurique. On obtient ces combinaisons en fondant l'acide tantalique avec du sulfate acide de potasse, et en épuisant la masse par l'eau bouillante ou en fondant le tantalate de soude avec du sulfate acide de potasse. Dans ce dernier cas, on obtient une masse entièrement soluble dans l'eau et qui laisse déposer par l'ébullition un précipité gélatineux, combinaison d'acide sulfurique et d'acide tantalique.

L'acide tantalique forme avec la soude une combinaison neutre cristallisable. Pour l'obtenir, on fond l'acide tantalique avec de l'hydrate de soude et on dissout la masse saline refroidie dans l'eau bouillante.

Par le refroidissement, le tantalate de soude cristallise en écailles nacrées. Il renferme 1 équivalent d'acide tanta-

---

(1) *Journal für praktische Chemie*, tome LXX, page 193, février 1847.

Digitized by Google

lique et 1 équivalent de soude combinés à une quantité variable d'eau de cristallisation. Le plus souvent on obtient les combinaisons suivantes :

$$NaO, TaO^3 + 5HO;$$
$$NaO, TaO^3 + 6HO;$$
$$NaO, TaO^3 + 7HO.$$

Ces sels se dissolvent facilement dans l'eau bouillante et cristallisent par le refroidissement. Si l'on veut obtenir des sels neutres, il faut avoir soin de maintenir un excès de soude dans la solution.

Lorsqu'on les chauffe, ils perdent leur eau de cristallisation sans fondre. Par la calcination, ils deviennent insolubles dans l'eau.

Lorsqu'on fond l'acide tantalique avec la potasse, on obtient une masse saline qui se dissout dans une petite quantité d'eau. Cette solution ne cristallise pas. Lorsqu'on y ajoute de l'alcool, il s'en précipite une poudre blanche qui est du tantalate acide de potasse.

Sur les rapports de l'Acide phosphorique à l'azote dans les graines des céréales; par M. Mayer (1).

Les conclusions suivantes sont extraites de ce travail :

1°. Les graines des céréales renferment des quantités d'eau à peu près constantes. Les différences du climat n'exercent à cet égard aucune influence.

2°. Les proportions d'acide phosphorique et d'azote qu'elles renferment varient, mais ces variations oscillent entre des limites assez restreintes.

Le tableau suivant donne les résultats des analyses qui ont été faites à ce sujet. Les échantillons des différentes espèces de céréales y sont classés d'après leur richesse en acide phosphorique.

---

(1) *Annalen der Chemie und Pharmacie*, tome CI, page 129 (nouvelle série, tome XXV), février 1857.

Digitized by Google

LOCALITÉ.	NATURE DU SOL.	ACIDE phospho-rique.	AZOTE	EAU.
SEIGLE.				
Seigle d'été de Schleissheim (H.-Bav.).	Calcaire.....	0,869	2,05	14,16
Seigle d'hiver de Brennberg (Palatinat)	Argile calcaire..	0,938	1,91	13,61
» de Mönchshofen (Basse-Bavière)..	Argile, alluvion du Danube...	0,886	2,04	13,86
» de Tiefenellern (Franconie)..	Calcaire.....	0,878	1,88	14,19
» de Geisfeld (Franconie).	Id.....	0,875	1,89	14,24
» de Gelchsheim, id.....	Argile grasse...	0,867	1,95	13,12
» de Gerhardsbrunn (Palatinat).....	?	0,859	1,84	14,06
» de Illerfeld (Souabe)...	?	0,856	2,04	13,59
» de Litzendorf (Haute-Franconie).....	Calcaire.....	0,798	1,68	14,31
» de Triesdorf (Moyenne-Franconie).....	Argile, et argile sablonneuse..	0,779	1,65	13,74
FROMENT.				
Blé de mars de Schleissheim..	Calcaire.....	1,025	1,99	13,47
Id.....	Id.....	0,903	1,65	14,33
Blé d'hiver de Triesdorf.....	Id.....	1,019	2,02	12,43
» de Gelchsheim.....	Argile grasse...	1,003	2,00	13,16
» de Triesdorf.....	Argile, et argile sablonneuse..	0,999	1,96	13,10
» de Geisfeld.....	Calcaire.....	0,968	3,00	13,83
» de Litzendorf.....	Id.....	0,915	1,89	13,68
» de Mönchshofen.....	Argile, alluvion du Danube...	0,899	1,97	10,97
» de Martinshöhe.....	?	0,806	1,91	13,11
» de Brennberg.....	Argile calcaire.	0,808	1,74	13,39
ORGE.				
Orge de Schleissheim.....	Calcaire.....	0,980	1,86	13,16
Id.....	Id.....	0,014	1,90	13,77
» de Gerhardsbrunn.....	?	0,947	1,72	12,36
» de Litzendorf.....	Calcaire.....	0,903	1,64	13,94
» de Geisfeld.....	Id.....	0,902	1,68	13,71
» de Illerfeld.....	?	0,889	1,70	12,51
» de Mönchshofen.....	Argile, alluvion du Danube...	0,867	1,73	10,75
» de Gelchsheim.....	Argile grasse...	0,808	1,67	13,24
» de Brennberg.....	Argile calcaire.	0,806	1,59	13,02
» de Triesdorf.....	Argile, et argile sablonneuse..	0,786	1,68	14,02

Digitized by Google

LOCALITÉ.	NATURE DU SOL.	ACIDE phosphorique.	AZOTE.	EAU.
AVOINE.				
Avoine de Triesdorf	Argile et argile sablonneuse	0,838	1,56	13,13
» de Illerfeld	?	0,821	1,67	11,79
» de Gerhardsbrunn	?	0,778	1,66	13,62
» de Litzendorf	Calcaire	0,767	1,46	12,81
» de Schleissheim	Id	0,754	1,56	12,36
» de Geisfeld	Id	0,718	1,60	13,86
» de Gelchsheim	Argile grasse	0,707	1,29	16,40
» de Tiefenellern	Calcaire	0,691	1,40	13,81

3°. La proportion des cendres dans les graines des céréales, débarrassées des barbes, varie également pour les différentes espèces entre des limites assez étroites.

4°. Plus la farine est finement blutée, moins elle renferme de phosphates et d'azote.

5°. Le son est riche en phosphates et en azote. La cendre du son est principalement formée par des phosphates et ne renferme que peu de silice.

6°. Les graines des légumineuses renferment plus d'azote et généralement plus d'acide phosphorique que les graines des céréales. Les cendres des céréales renferment des pyrophosphates, celles des graines des légumineuses renferment des phosphates tribasiques.

7°. Il existe une relation remarquable entre les matières albuminoïdes et l'acide phosphorique que renferment les graines. A une augmentation dans la proportion de l'acide phosphorique, correspond une augmentation dans la proportion des matières albuminoïdes. On peut donc admettre que la formation des matières albuminoïdes dans les graines est subordonnée à l'existence des phosphates.

8°. Ce rapport diffère pour chaque matière albuminoïde, pour l'albumine végétale, pour la légumine, pour le

Digitized by Google

gluten. Les graines des légumineuses qui renferment principalement de l'albumine soluble et de la légumine contiennent, pour la même proportion d'acide phosphorique, une fois et demie à deux fois plus d'azote que les graines des céréales qui renferment principalement du gluten.

9°. Lorsque l'une de ces substances protéiques est remplacée par une autre dans les semences de la même espèce et de la même variété, comme M. Millon l'a montré pour le blé, le rapport de l'azote à l'acide phosphorique se modifie par cela même, etc.

Formation du formiate d'Ethyle par l'acide oxalovinique; par M Church (1).

Lorsqu'on chauffe l'acide oxalique avec de la pierre ponce, du sable, ou de la glycérine, il se transforme en acide formique et en acide carbonique.

L'acide oxalovinique, chauffé avec la glycérine, se transforme en éther formique et en acide carbonique,

$$\underbrace{C^4 \left\{ \begin{matrix} C^4 H^5 \\ H \end{matrix} \right\} O^8}_{\text{Acide oxalovinique.}} = \underbrace{C^6 H^6 O^4}_{\text{Ether formique.}} + 2\,CO^2.$$

MÉMOIRES SUR LA PHYSIQUE PUBLIÉS A L'ÉTRANGER,

EXTRAITS PAR M. VERDET.

Note sur le magnétisme des barreaux d'acier; par M. Wiedemann (2).

M. Wiedemann a étudié les phénomènes qui accompagnent le renversement du magnétisme dans les barreaux d'acier. Il s'est servi de barreaux de 22 centimètres de lon-

(1) *Annalen der Chemie und Pharmacie*, tome C, page 256 (nouvelle série, tome XXIV).

(2) *Poggendorff's Annalen*, tome C, page 235, février 1857.

Digitized by Google

gueur sur 13^{mm},5 de diamètre, recuits avec soin pour être entièrement débarrassés de tout leur magnétisme, et par conséquent très-faiblement trempés. Pour aimanter chaque barreau, on le faisait passer plusieurs fois à travers une spirale magnétisante de 500 à 600 tours et de 24 centimètres de longueur; puis on déterminait successivement : 1° l'action de la spirale sur une aiguille aimantée placée à distance; 2° l'action simultanée de la spirale et du barreau placé dans son axe; 3° l'action du barreau après la suppression du courant (1). On déterminait ensuite par tâtonnements l'intensité du courant contraire au précédent, qui était nécessaire pour détruire l'aimantation du barreau.

Les expériences ont fait ressortir les faits suivants :

1°. Si l'on aimante un barreau non magnétique par des courants d'intensité croissante, il n'arrive pas toujours que son magnétisme aille en croissant régulièrement. Mais si, après l'avoir fortement aimanté, on le désaimante et qu'on l'aimante de nouveau par une série de courants d'intensité croissante, son aimantation croît régulièrement, et est, toutes choses égales d'ailleurs, un peu plus forte que dans la première série d'expériences. Il semble donc que la première aimantation et la désaimantation qui l'a suivie aient donné aux molécules une mobilité favorable à toute aimantation ultérieure.

2°. Le magnétisme développé pendant l'action du courant croît un peu moins vite que l'intensité du courant. Le magnétisme, qui demeure après que le courant a cessé, croît moins vite encore.

3°. L'intensité du courant nécessaire pour désaimanter un barreau est toujours *beaucoup plus faible* que l'intensité du courant qui l'a aimanté.

(1) L'aiguille aimantée était un miroir d'acier dont les déviations se mesuraient par l'observation de l'image d'une règle divisée horizontale. Par suite de la grande distance de l'aiguille au barreau et à la spirale qui l'entourait, les déviations pouvaient être regardées comme proportionnelles aux actions exercées sur l'aiguille.

Digitized by Google

4°. Si un barreau désaimanté par l'action de la chaleur est fortement aimanté par un courant, puis désaimanté par un courant contraire, ce courant contraire, ou à fortiori, un courant plus faible, ne peut aimanter le barreau dans le sens opposé à l'aimantation primitive. Mais si on le fait agir dans le sens de l'aimantation primitive, il aimante sans difficulté. Ce résultat est particulièrement intéressant et montre qu'il n'est pas indifférent de désaimanter un barreau par l'action de la chaleur ou par l'action d'un courant contraire à l'aimantation.

5°. Si l'on aimante un barreau par un courant d'intensité *i* et qu'on le désaimante ensuite partiellement par un courant contraire, il faut encore un courant d'intensité *i* pour lui rendre son aimantation primitive.

6°. On donne à un barreau l'aimantation A : par un courant contraire d'intensité *i*, on réduit cette aimantation à la valeur B; par un courant de même sens que le premier, mais d'intensité moindre, on ramène cette aimantation à la valeur C plus petite que A. Pour faire décroître de nouveau cette aimantation jusqu'à B, il faut encore un courant d'intensité *i*.

7°. Les coups donnés au barreau pendant qu'il est soumis à l'action de la spirale magnétisante, augmentent l'aimantation permanente qu'il conserve après que le courant a cessé d'agir. Au contraire, les coups donnés après que l'action du courant a cessé, font décroître l'aimantation permanente. Un barreau désaimanté par l'action d'un courant reprend, sous l'influence des coups, une partie de son magnétisme primitif. Il est bien évident que dans ces expériences les barreaux doivent être disposés perpendiculairement au méridien magnétique.

L'attention de M. Wiedemann s'est encore portée sur l'influence des variations de température, récemment étudiée par M. Dufour. D'après les observations de ce physicien, un barreau aimanté à une température donnée, per-

Digitized by Google

drait du magnétisme aussi bien par l'influence du froid que par l'influence de la chaleur; il deviendrait insensible aux changements de température lorsqu'il aurait été soumis plusieurs fois de suite à des changements inverses d'une amplitude un peu considérable (1). Les expériences de M. Wiedemann donnent l'explication de ces faits singuliers.

M. Wiedemann a aimanté un barreau d'acier, par le procédé indiqué plus haut, à la température de 16 degrés centigrades; il l'a porté lentement, deux fois, à la température de 100 degrés, en le laissant revenir à la température ordinaire après chaque échauffement. Il l'a ensuite aimanté de nouveau à 16 degrés centigrades, et il a répété un certain nombre de fois la suite de ces opérations, en mesurant les variations du magnétisme du barreau. Il a déduit de ses expériences les conclusions suivantes :

Un barreau échauffé perd de son magnétisme et ne reprend par le refroidissement qu'une partie du magnétisme qu'il a perdu. Il y a donc en définitive diminution de l'aimantation par suite de ces alternatives; une répétition de ces mêmes alternatives produit une nouvelle diminution permanente, mais plus faible que la première, et si l'on soumet le barreau à une série suffisamment prolongée d'échauffements et de refroidissements alternatifs, on l'amène à un état où l'échauffement ne produit plus de diminution permanente du magnétisme. Il y a toujours une diminution temporaire, mais beaucoup plus faible que dans l'état primitif. Ces résultats ne s'accordent pas complétement avec ceux de M. Dufour.

Afin d'étudier l'influence du refroidissement sur des barreaux aimantés à une température élevée, M. Wiedemann a aimanté un barreau à 100 degrés, l'a refroidi à zéro et a répété un certain nombre de fois ces alternatives. Toutes ses expériences lui ont montré qu'un barreau aimanté à

(1) Voyez les deux Notes de M. Dufour dans la *Bibliothèque universelle de Genève* pour 1856.

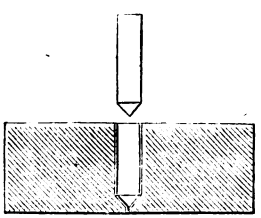
Digitized by Google

une haute température perd une partie de son magnétisme par un premier refroidissement, ainsi que l'a constaté M. Dufour; mais un échauffement qui succède à ce refroidissement amène une nouvelle perte du magnétisme, et le barreau revient à l'état ordinaire, de telle façon que son aimantation soit toujours plus forte à froid qu'à chaud.

Mémoire sur la conductibilité électrique des métaux des alcalis et des terres alcalines; par M. Matthiessen (1).

Les progrès qui ont été réalisés depuis quelques années dans la préparation des métaux les plus oxydables, ont permis d'étudier les propriétés physiques de ces corps qui étaient restées jusqu'à ces derniers temps presque entièrement ignorées. M. Matthiessen s'est occupé d'en déterminer la conductibilité électrique; il a exécuté ses expériences dans le laboratoire de M. Kirchoff, à Heidelberg.

La principale difficulté que présentaient ces recherches était la fabrication de fils fins et homogènes de ces métaux. M. Matthiessen l'a surmontée en faisant passer les métaux à la filière par pression, au lieu d'opérer par traction comme on fait d'ordinaire. Le métal était introduit dans une petite cavité cylindro-conique pratiquée dans une pièce d'acier, présentant, au sommet du cône qui la terminait, une petite ouverture. On enfonçait dans cette cavité un piston d'acier de même forme, et en exerçant sur ce piston une pression suffisante, on faisait sortir le métal sous forme de fil par l'orifice de la cavité. Ce petit appareil est représenté ci-contre, avec ses véritables dimensions. Dans le cas



(1) *Philosophical Magazine*, 4e série, tome XIII, page 81, février 1857.

Digitized by Google

du potassium, du sodium et du lithium, qui sont à la fois très-ductiles et très-oxydables, l'opération avait lieu sous l'huile de naphte; dès que le fil apparaissait, on le saisissait avec une pince et on le tendait, tout en le laissant reposer sur une plaque de verre horizontale, afin d'éviter toute déformation. Dans le cas du magnésium, qui est très-peu ductile et assez peu oxydable, on échauffait la presse à l'aide d'une lampe d'émailleur et, par conséquent, on opérait dans l'air. Enfin dans le cas du strontium et du calcium, qui ne sont pas plus ductiles que le magnésium, mais beaucoup plus oxydables, on échauffait la presse et on recevait le fil immédiatement à sa sortie dans un tube plein d'huile de naphte.

Les résistances étaient mesurées par la méthode de M. Kirchhoff. Le fil de comparaison était un fil de cuivre, dont la conductibilité avait été soigneusement comparée à celle de l'argent (1). En désignant par 100 la conductibilité électrique de l'argent, M. Matthiessen a trouvé les nombres suivants :

Sodium.	37,43	à la température de	21°,7
Magnésium ..	25,47	»	17,0
Calcium.....	22,14	»	16,8
Potassium....	20,85	»	20,4
Lithium.....	19,00	»	20,0
Strontium....	6,71	»	20,0

Chacun des nombres inscrits dans ce tableau est la moyenne de trois à sept observations très-concordantes. Les nombres relatifs au potassium et au sodium présentent seuls un peu d'incertitude par suite de la rapide oxydation de ces métaux qui en diminue incessamment la conducti-

(1) Le calcul des expériences exige qu'on connaisse le diamètre des fils. Pour les métaux pressés à froid, M. Matthiessen a admis que le diamètre des fils était le même que le diamètre de l'orifice de la filière. Il a déterminé directement, à l'aide du microscope, le diamètre des fils préparés à chaud.

Digitized by Google

bilité. M. Matthiessen s'est assuré que dans une expérience de moins d'une heure, cette cause d'erreur exerçait une influence sensible.

Le potassium et le sodium avaient été pris dans le commerce, qui en livre aisément aujourd'hui des échantillons assez purs. Les autres métaux avaient été préparés par voie électrochimique.

M. Matthiessen a étudié l'influence de la température sur la conductibilité du potassium et du sodium. Ces métaux étaient fondus, à l'abri du contact de l'air, dans des tubes de verre cylindriques, et ne communiquaient avec l'extérieur que par l'intermédiaire de petites colonnes de mercure. On chauffait ces tubes dans l'eau ou dans une dissolution de chlorure de calcium. Comme par suite de la solidification du métal il se produisait des vides sensibles à l'intérieur, ces expériences n'ont pas été très-précises, et M. Matthiessen le reconnaît lui-même. Elles ont néanmoins démontré que la conductibilité de ces métaux diminue quand la température s'élève, et est beaucoup plus faible à l'état liquide qu'à l'état solide. Pour le sodium, il y a un saut brusque dans la marche de la conductibilité à la température de fusion, 93°,4 ; pour le potassium, il y a une variation très-rapide entre les températures de 47 et 57 degrés, mais point de saut brusque.

M. Matteucci a trouvé que la conductibilité du bismuth fondu est plus grande que celle du bismuth solide. M. Matthiessen a vérifié ce résultat et a obtenu un résultat analogue par l'alliage fusible de Rose. Comme le bismuth et l'alliage de Rose se contractent tous les deux par la fusion, on peut présumer que l'accroissement de conductibilité et la contraction sont liés ensemble.

Digitized by Google

MÉMOIRE SUR LA TORSION;

PAR M. G. WERTHEIM.

Présenté à l'Académie des Sciences dans sa séance du 19 février 1855.

PREMIÈRE PARTIE.

Sur les effets mécaniques de la torsion.

I. — Toute force extérieure qui agit sur un corps solide fait subir à celui-ci un changement de forme qui peut servir à la vérification des lois générales et des hypothèses fondamentales de la théorie de l'élasticité; mais tous les changements de forme ne peuvent pas être mesurés avec une égale facilité ni avec la même précision, tous ne sont pas également aptes à faire ressortir le moindre désaccord qui existerait entre le calcul et l'expérience, et à contribuer ainsi aux progrès de la théorie elle-même. A cet égard, les lois de la torsion présentent un intérêt théorique tout particulier qui s'accroît encore par l'importance de leurs applications.

Le problème qu'il s'agit de résoudre peut être énoncé de la manière suivante : Étant donné un corps solide de forme et de dimensions quelconques, dont on connaît les axes d'élasticité et de cohésion, déterminer son moment de torsion et sa résistance à la rupture, quelle que soit la position de l'axe de torsion par rapport à ces axes; ou réciproquement, étant donné un couple qui agit sur une section quelconque de ce corps, déterminer les déplacements qu'éprouvera celui-ci en chaque point.

Posé d'une manière aussi générale, ce problème rentre dans la question qui a été proposée depuis plusieurs années par l'Académie comme sujet d'un concours pour le prix de mathématiques, et qui a résisté jusqu'ici à tous les efforts des géomètres. Peut-être sera-t-on plus heureux lorsque l'on

Digitized by Google

remplacera les hypothèses fondamentales plus ou moins arbitrairement choisies par des données positives que fournissent les expériences auxquelles heureusement on a depuis longtemps emprunté la loi de la proportionnalité entre les tractions et les allongements.

J'ose espérer que quelques-uns des résultats contenus dans ce Mémoire pourront servir non-seulement comme moyens de contrôle pour les théories connues, mais encore comme des points de départ pour ces recherches futures.

HISTORIQUE.

II. — C'est à Coulomb que revient le mérite d'avoir jeté les bases de la théorie de la torsion des cylindres à base circulaire, et d'avoir soumis cette théorie à une vérification expérimentale qui conserve encore actuellement toute sa valeur (*) ; M. Biot (**) a complété les publications de Coulomb en y ajoutant toutes les données nécessaires pour le calcul, qui se trouvaient consignées dans les manuscrits de l'auteur. Ces recherches ont prouvé, mais seulement pour des fils dont le diamètre est très-petit par rapport à leur longueur, que les angles de torsion sont proportionnels à la longueur, et réciproquement proportionnels au moment d'inertie de la base du cylindre par rapport à son centre. Coulomb a également observé que chaque fil acquiert des torsions permanentes de plus en plus grandes à mesure qu'on l'écarte davantage de sa position d'équilibre primitive, et que ces torsions permanentes ne sont dans aucun rapport fixe avec les torsions temporaires coexistantes. En effet, il fait voir qu'il arrive un moment où ces dernières ne prennent que de très-petits accroissements, tandis que les premières augmentent d'une manière très-rapide ; enfin Cou-

(*) *Mémoires des Savants étrangers*, tome IX, et *Mémoires de l'Académie*, 1784.

(**) *Traité de Physique*, tome I, pages 483 et suiv.

Digitized by Google

lomb a remarqué que la surface de rupture du fil avait exactement la figure d'une corde formée de deux brins tordus ensemble.

Depuis les recherches de Coulomb jusqu'à la découverte des équations générales de l'élasticité, la théorie ne fit aucun progrès sensible : on était obligé d'introduire dans les formules des coefficients spéciaux de résistance à la torsion temporaire et de résistance à la rupture, sans connaître aucun rapport entre ces coefficients et ceux que l'on employait pour calculer les résistances à l'allongement ou à la flexion ; en un mot, chaque mode d'action de la force et même chaque forme particulière du corps exigeaient l'emploi de coefficients particuliers.

La création de la théorie mathématique de l'élasticité, qui comprend comme cas particulier la théorie de la torsion, a fait cesser cet état de choses ; Poisson, M. Cauchy et MM. Lamé et Clapeyron ont déduit de cette théorie les lois générales de l'équilibre entre le moment de la force appliquée et les moments de la résistance élastique des cylindres et des prismes carrés ou rectangulaires, que la substance soit isotrope ou hétérotrope, et quelles que soient dans ce dernier cas les directions des axes d'élasticité. Les lois des vibrations tournantes et même celles de la résistance à la rupture produite par la torsion se rattachaient directement à ces résultats, auxquels MM. Neumann (*), Stokes (**) et Maxwell (***) n'ont rien ajouté d'essentiel, quoiqu'ils y soient arrivés par des voies différentes. Toutes ces recherches contiennent les hypothèses ou restrictions suivantes, soit explicitement posées, soit implicitement admises pour faciliter les calculs :

1°. Que les angles de torsion sont très-petits, qu'ils sont

(*) *Mémoires de l'Académie de Berlin*, 1841, 2e partie.

(**) *Philosophical Transactions* de Cambridge, tome VIII, 3e partie.

(***) *Transactions de la Société royale d'Edimbourg*, t. XX, 1re partie.

Digitized by Google

purement temporaires, proportionnels aux longueurs et proportionnels aux moments des forces appliquées ;

2°. Que le corps ne subit aucun changement de volume par l'effet de la torsion ;

3°. Que les dimensions transversales du corps sont assez petites par rapport à sa longueur pour qu'après avoir développé les pressions intérieures et les déplacements en séries, ordonnées suivant les puissances ascendantes de ces dimensions, on puisse négliger tous les termes qui ont pour facteur le carré de l'une de ces dimensions.

M. de Saint-Venant a fait plusieurs publications destinées à développer la théorie que M. Cauchy a donnée de la torsion des verges rectangulaires, et à en faire ressortir toutes les conséquences : M. de Saint-Venant admet donc les hypothèses que nous venons de rappeler, mais il fait remarquer que les déplacements longitudinaux ne sont pas nécessairement nuls dans cette théorie : égaux entre eux pour tous les points qui étaient primitivement situés sur une même parallèle aux arêtes, ces déplacements peuvent varier d'un point à l'autre dans une même section transversale ; donc en plaçant l'axe de torsion parallèlement à l'axe des x et en désignant par ξ' l'excès du déplacement longitudinal d'un point quelconque sur celui du centre de sa section, M. de Saint-Venant fait les suppositions suivantes : le changement du volume est nul, $v = 0$; en outre on met

$$\frac{d^2\eta}{dx^2} = 0 ; \quad \frac{d^2\zeta}{dx^2} = 0 ; \quad \frac{d^2\eta}{dx\,dy} = 0 ; \quad \frac{d^2\zeta}{dx\,dz} = 0 ;$$

$$\eta = \theta xz ; \qquad \zeta = -\theta xy,$$

où θ représente l'angle de torsion pour l'unité de longueur. Les trois équations connues de l'équilibre intérieur d'un corps homogène se réduisent alors à l'équation

$$\frac{d^2\xi'}{dy^2} + \frac{d^2\xi'}{dz^2} = 0,$$

Digitized by Google

que l'on intègre de manière à satisfaire aux conditions connues de l'équilibre de la surface (*).

(*) Cette intégration n'a pas été effectuée dans le premier Mémoire que M. de Saint-Venant a publié sur ce sujet (*Compte rendu* du 20 nov. 1843); ayant reconnu que l'emploi réitéré de la méthode des constantes indéterminées peut conduire à des résultats inexacts, M. de Saint-Venant crut devoir emprunter aux expériences la correction qu'il voulait appliquer aux formules. « Celles de Savart, dit-il, semblent indiquer qu'il faut prendre » 0,9 pour coefficient de correction du moment de torsion et généralement » de toutes les formules où entre la constante G. » Cette remarque était parfaitement exacte et conforme à l'opinion émise par MM. Biot, Lamé et Clapeyron. Aussi j'ai été étonné de trouver un contradicteur dans M. de Saint-Venant, lorsque je fis voir qu'une correction très-peu différente de celle qu'il avait trouvée empiriquement, une correction de $\frac{15}{16}=0{,}9375$, était la conséquence nécessaire de la modification que j'avais été amené à faire subir aux équations générales de l'équilibre. A cette occasion j'avais fait quelques expériences sur les vibrations tournantes des verges carrées, et j'en avais communiqué les résultats à M. de Saint-Venant en lui faisant remarquer qu'ils ne s'accordaient pas avec le rapport entre les nombres de vibrations longitudinales et tournantes que M. Cauchy avait trouvé pour ce cas. M. de Saint-Venant non-seulement se crut autorisé à publier ces expériences trop incomplètes (*Compte rendu* du 15 janvier 1849), mais il essaya même de s'en servir pour attaquer les bases de mon travail; je crois avoir suffisamment répondu aux objections de M. de Saint-Venant (*Compte rendu* du 22 janvier 1849), et j'aurais eu l'occasion de compléter cette réponse si M. de Saint-Venant avait publié le travail qu'il avait annoncé dans les termes suivants : « L'inégalité de leur élasticité (des tiges métalliques ou » vitreuses) en divers sens suffit pour expliquer les différences trouvées, » sans changer les formules démontrées par les géomètres pour le cas d'é- » gale élasticité, ainsi que j'espère le faire voir bientôt. »

Depuis cette époque je n'ai pas cessé de m'occuper de cette question, et le 8 novembre 1852 j'ai eu l'honneur de présenter à l'Académie une Note sur des courants d'induction produits par la torsion; j'annonçais en même temps que cette Note ferait partie d'un travail plus complet sur la torsion en général.

Le 13 juin 1853 M. de Saint-Venant présenta à l'Académie un nouveau Mémoire sur la torsion des prismes, dans lequel, après avoir résumé ses précédentes publications, il traite analytiquement plusieurs des problèmes spéciaux dont je m'occupais de mon côté. Cette coïncidence me força à prier l'Académie dans la séance suivante de vouloir bien faire constater les résultats auxquels j'étais arrivé dès cette époque, et cela me parut d'autant plus nécessaire, que la communication de M. de Saint-Venant, quoique en désaccord avec mes résultats sur des points essentiels, contenait cependant

Digitized by Google

MM. Heim (*) et Segnitz (**) n'ont pas supposé que le changement de volume devait être nul ; ce dernier géomètre s'est même spécialement occupé de sa détermination et de l'influence qu'il peut exercer sur la valeur des angles de torsion ; mais les formules n'étant pas déduites des équations générales de l'équilibre, on a été obligé d'introduire dans le calcul des hypothèses spéciales sur le mode d'action des forces et de supposer la mobilité absolue des extrémités de la pièce tordue, mobilité qu'il est impossible de réaliser dans les expériences ; quoi qu'il en soit, les résultats obtenus par les deux géomètres ne se trouvent pas confirmés par les expériences contenues dans ce Mémoire.

Il y a lieu de s'étonner du petit nombre de recherches expérimentales qui ont été publiées sur un sujet aussi important. Depuis le travail de Coulomb, celui de Savart (***) est le seul qui ait été destiné à la vérification de la théorie ; car les recherches de Duleau et de MM. Bevan et Giulio avaient un but essentiellement pratique, et M. Kupffer s'est seulement servi des formules admises pour déduire de ses expériences la constante numérique, le coefficient d'élasticité de chacun des fils métalliques qui avaient été soumis à la torsion.

Savart a vérifié et confirmé les lois de la torsion des verges rectangulaires que M. Cauchy venait de découvrir ; mais cette vérification a été faite entre des limites trop

---

quelques faits que je croyais avoir observés le premier, tels par exemple que la formation de fentes longitudinales dans les barres de bois ou de fer que l'on soumet à la torsion.

Le Mémoire de M. de Saint-Venant n'a pas encore été publié en entier, et je ne le connais que par l'extrait qui en a paru dans les *Comptes rendus* et par le rapport très-favorable qu'en a fait M. Lamé à l'Académie.

(Depuis la présentation de ce Mémoire, le travail de M. de Saint-Venant a été inséré au tome XIV du *Recueil des Savants étrangers.*)

(*) *Sur l'équilibre et le mouvement des corps solides élastiques,* page 246.

(**) Crelle, *Journal de Mathématiques,* tome XLIII, page 340.

(***) *Annales de Chimie et de Physique,* 2e série, tome XLI.

Digitized by Google

étroites et dans les conditions les plus favorables pour faire disparaître et non pour faire ressortir un désaccord quelconque entre la théorie et les faits ; les côtés des lames carrées ne variaient que de $4^{mm},68$ à $9^{mm},18$; les lois des verges rectangulaires ont été prouvées principalement par des expériences sur des verges en bois, lesquelles présentent une trop grande variabilité dans la valeur de leurs trois coefficients d'élasticité pour que ces expériences fussent susceptibles d'une grande exactitude. De plus, Savart s'est généralement borné à observer les très-petits angles qui ne lui paraissaient être accompagnés d'aucune torsion permanente, et à comparer entre elles des verges de la même substance et de sections semblables, mais dont il n'avait pas déterminé d'avance le coefficient d'élasticité ; la vérification des termes constants qui sont compris dans les formules était donc restée complétement en dehors de ses recherches.

Voulant éviter la construction d'un appareil spécial, Savart a employé une disposition qui eut l'inconvénient de laisser toujours subsister quelques doutes et sur la fixité absolue de l'extrémité encastrée et sur la vraie longueur du bras de levier, qu'il aurait fallu mesurer toujours à partir de l'axe de torsion ; aussi, ayant observé quelque léger désaccord entre ses expériences et la loi de proportionnalité qui relie entre eux les angles, les moments et les longueurs, Savart crut devoir attribuer ces différences à des glissements qui auraient eu lieu au point d'encastrement, tandis qu'elles tenaient essentiellement à la nature même du phénomène, ainsi qu'on le verra plus loin.

Nous venons de rappeler les causes des incertitudes qui subsistent toujours en ce qui concerne le calcul de la torsion temporaire des verges homogènes de différentes formes ; mais ces incertitudes sont incomparablement plus grandes lorsqu'il s'agit de la torsion temporaire de substances non isotropes ou bien de la torsion permanente, des

Digitized by Google

vibrations tournantes et de la résistance à la rupture effectuée par la torsion. Sur tous ces points nous manquons des données expérimentales les plus indispensables. J'espère que ce court exposé historique suffira pour faire comprendre que j'ai été réellement dans la nécessité de vérifier et de remettre en question toutes les lois généralement admises, et d'opérer en même temps sur une échelle assez grande pour que mes résultats, sans rien perdre de leur précision, puissent être de quelque utilité pour la pratique.

Description de l'appareil.

III. — Je me suis appliqué à éviter les causes d'erreur que je viens de signaler, et à bien préciser les conditions de chaque expérience, afin qu'il restât le moins de doute possible sur le mode d'action de la force et sur le genre de déplacement qu'elle avait pu produire. On suppose ordinairement que l'extrémité à laquelle le couple tordant est appliqué, jouit malgré cela d'une mobilité absolue dans le sens longitudinal, et que la torsion s'opérant par la simple rotation des sections contiguës, ne fait naître aucune composante longitudinale qui tendrait à déplacer les centres de ces différentes sections. En réalité, lorsque nous faisons agir un couple, nous ignorons si nous n'appliquons pas en même temps une force longitudinale : quelle que soit la disposition mécanique que l'on adopte, l'inertie des poids qui constituent le couple opposera toujours une certaine résistance au déplacement longitudinal de la section sur laquelle il agit directement, de sorte qu'il reste une double incertitude et par rapport aux forces appliquées et par rapport à la véritable longueur de la barre tordue au moment où l'équilibre s'établit.

Cette dernière incertitude est éliminée par mon appareil : les deux sections extrêmes de la barre tordue y sont toujours maintenues à la même distance l'une de l'autre ; en outre, cette barre soumise à l'action d'un véritable

Digitized by Google

couple ne supporte aucune partie de la charge et n'éprouve aucune flexion transversale, la longueur du bras de levier est toujours bien définie, et en même temps l'appareil qui a été construit avec beaucoup de précision par M. Bréguet présente une masse et une rigidité telles, que les flexions et les torsions qu'il peut éprouver lui-même deviennent tout à fait négligeables.

La face supérieure d'un banc en fonte *a*, *Pl. I, fig.* 1 et 2, est bordée de deux rails dont l'un *b* a une section carrée, et l'autre *c* une section triangulaire ; sur ces rails se meuvent trois chariots munis de coulisses qui correspondent au rail triangulaire ; deux de ces chariots *d* et *e* sont accouplés et portent des coussinets destinés à recevoir les tourillons de la roue à la circonférence de laquelle les poids sont appliqués ; le troisième *f* porte une espèce d'étau extrêmement solide. Au-dessous de chaque chariot se trouve une plaque en fonte *g* qui se meut dans deux entailles ménagées à la face intérieure des rails ; le chariot est réuni à sa plaque par des vis *h* qu'il suffit de serrer pour que le système soit fixé d'une manière invariable, les rails étant alors serrés par en haut et par en bas, et tout mouvement latéral étant écarté par leur forme même.

Les tourillons légèrement coniques de la roue à gorge *i* roulent dans leurs coussinets avec un faible frottement ; le tourillon antérieur porte une large pièce *k* qui reçoit différentes mâchoires *l* appropriées aux dimensions et au contour de la barre que l'on veut y encastrer ; l'étau mobile *f* étant fixé à la distance voulue, on y encastre l'autre extrémité ou la section qui limite la longueur sur laquelle on veut opérer ; les vis des deux étaux permettent de centrer la pièce et de faire coïncider son axe de figure avec l'axe de torsion.

Dans la surface antérieure de la roue se trouve incrusté un grand cercle divisé en sixièmes de degrés sexagésimaux, et les angles se mesurent au sixième de minute près à

Digitized by Google

l'aide du vernier fixe *m*. Cette roue reçoit à sa circonférence l'action de deux poids équivalents, qui sont supportés par deux cordes dont l'une *n* embrasse la moitié supérieure de sa gorge, tandis que l'autre *o*, après avoir embrassé la moitié inférieure de cette gorge, passe sur une poulie de renvoi *p* dont la chape est fixée au plafond et dont la gorge se trouve dans le même plan que celle de la roue.

Nous venons de dire que l'on applique des poids équivalents et non égaux ; en effet, du côté où la corde passe sur la poulie de renvoi il faut une charge un peu plus considérable afin de compenser les pertes de force qui proviennent du frottement sur cette poulie et de la roideur de la corde ; pour dresser préalablement une Table des poids équivalents, on a disposé les cordes de telle façon, que les poids appliqués tendissent à faire tourner la roue en sens inverse l'un de l'autre, au lieu d'agir dans le même sens comme cela a lieu dans les expériences mêmes ; les poids qui se font équilibre sont ceux que nous avons nommés équivalents ; en général la charge du côté de la poulie de renvoi était de $\frac{1}{20}$ environ supérieure à celle qui agissait directement.

Vu le grand diamètre de la roue et le faible diamètre de la corde, la roideur de celle-ci était généralement négligeable pour les charges directement appliquées ; seulement pour les poids très-faibles on a eu soin de remplacer ces cordes par des ficelles.

Avec cette disposition l'intensité du couple est sans influence sur le frottement des tourillons dans leurs coussinets : la roue est constamment équilibrée, et c'est la poulie de renvoi qui supporte toute la pression des poids. Nous avons figuré les cordes dans la position où les charges tendent à faire tourner la roue de gauche à droite, mais il suffit de les renverser pour que la torsion ait lieu en sens contraire ; si la pièce est bien centrée, les angles de torsion seront égaux entre eux dans les deux positions : c'est un

Digitized by Google

moyen de vérification que nous avons eu soin d'employer.

Il restait à s'affranchir des erreurs provenant soit d'un glissement de la pièce dans l'étau fixe, soit de la torsion que cet étau pouvait subir lui-même, soit enfin de ce que la forme de la pièce pouvait être altérée en cet endroit par la pression des vis. Cette cause d'erreur a été éliminée par le même artifice au moyen duquel j'ai rendu la mesure des allongements indépendante de la flexion du support : aux deux points de repère que l'on emploie dans ce dernier cas, j'ai substitué deux cercles divisés dont le premier vient d'être décrit, tandis que le second est fixé sur l'étau tout près du point d'encastrement lui-même ; les angles de torsion étant nécessairement petits en cet endroit, il a suffi d'y placer un demi-cercle q dont le vernier r est rendu solidaire avec la pièce en expérience au moyen de quatre petites vis. L'angle de torsion corrigé qui correspond à la longueur comprise entre la face antérieure des mâchoires l et le point d'application du vernier r, cet angle est donné par la différence des angles de torsion, qu'on lit sur les deux cercles divisés. Mais bientôt les expériences ont fait voir que la torsion de l'étau était complétement négligeable et que l'on pouvait employer l'angle non corrigé toutes les fois que l'encastrement était suffisamment fixe ; cependant ce dispositif a été très-utile pour avertir du moindre glissement de la pièce dans l'étau.

IV. — D'après l'exposé historique qui précède, nos recherches expérimentales devaient porter principalement sur les points suivants :

1°. La loi de proportionnalité entre les angles de torsion d'un côté et les moments des couples et les longueurs de l'autre côté reste-t-elle rigoureusement vraie quelle que soit la grandeur de la torsion temporaire ?

2°. Quel rapport y a-t-il entre les angles de torsion temporaires et permanents ?

3°. La torsion temporaire n'est-elle accompagnée d'au-

Digitized by Google

cun changement de volume, et s'il n'en est pas ainsi, quels sont les rapports entre ces changements de volume et entre les forces appliquées, les formes et les dimensions des corps ?

4°. Jusqu'à quel point les formules trouvées par les géomètres s'accordent-elles avec les observations lorsque l'on fait porter celles-ci sur des corps isotropes ou hétérotropes, lorsque l'on fait varier autant que possible les élasticités absolues, les formes et les dimensions, et lorsque l'on tient compte aussi bien des constantes numériques que des fonctions des variables qui sont comprises dans ces formules ?

5°. Ces constantes contiennent un terme qui dépend du rapport des deux constantes comprises dans les équations générales de l'équilibre ; on pourra donc voir si les résultats sont conformes à la valeur numérique de ce rapport que l'on avait précédemment adoptée ou bien à celle que j'ai cru devoir lui substituer ?

La solution de toutes ces questions suppose que l'on ait déterminé préalablement, au moyen d'une méthode autre que celle de la torsion, le coefficient ou les coefficients d'élasticité de toutes les pièces destinées aux expériences ; j'ai employé à cet effet l'allongement direct, et j'ai cru pouvoir me dispenser de rapporter ici les détails de ces expériences tout à fait analogues à celles que j'ai déjà publiées sur le même sujet. Je ferai seulement remarquer qu'une nouvelle installation de mon appareil m'a permis de soumettre à l'allongement jusqu'à des longueurs de 2 mètres, en observant les déplacements des deux points de repère à l'aide de deux cathétomètres placés à différentes hauteurs ; la longueur totale a été mesurée à l'aide d'un troisième point de repère placé vers le milieu de la pièce et sur lequel on pouvait pointer les lunettes des deux cathétomètres. Plusieurs des barres destinées aux expériences avaient des sections transversales trop considérables pour donner des allongements suffisants avec les charges même les plus grandes

Digitized by Google

que mon appareil peut supporter, et généralement, quelque soin que l'on apporte aux expériences, les allongements sont dans tous les cas tellement petits, que l'on ne peut guère les mesurer avec nos moyens actuels à plus de $\frac{1}{100}$ et même de $\frac{1}{50}$ près. Pour ces motifs j'ai fait faire plusieurs séries de barres de différentes dimensions transversales; toutes les pièces d'une série proviennent d'une seule masse de fer, d'acier ou de cuivre, et ont été étirées et recuites de la même façon : on pouvait donc admettre que le coefficient d'élasticité était le même pour toutes les barres d'une même série et ne soumettre à l'allongement que la plus mince d'entre elles; pour vérifier ensuite les termes variables on pouvait, en éliminant le coefficient d'élasticité commun, s'affranchir de toute erreur dont sa détermination aurait été affectée.

Mes expériences ont porté sur les 65 pièces suivantes, toutes sans soudure, bien calibrées, et autant que possible sans défaut :

6 cylindres pleins à base circulaire, en acier, fer, cuivre jaune et verre ;

10 cylindres creux à base circulaire, dont 6 en cuivre jaune et 4 en fer ;

4 cylindres pleins à base elliptique, dont 2 en acier et 2 en cuivre jaune ;

Une série de 12 prismes en fer à bases rectangulaires, dont 3 carrées et 10 ayant la même largeur de 24 millimètres, et des épaisseurs graduées depuis 24 millimètres jusqu'à 1 millimètre;

Une série de 5 prismes en acier fondu, à bases rectangulaires et équivalentes, mais dans lesquelles les rapports des deux côtés varient depuis 36 jusqu'à 1 ;

21 prismes à bases rectangulaires de différentes dimensions, en acier, fer, tôle, cuivre jaune et en verre de différentes espèces ;

3 prismes creux en cuivre jaune, à bases rectangulaires ;

4 prismes en bois de chêne et de sapin.

Digitized by Google

Les observations se font de la même façon sur le grand et sur le petit cercle : au commencement de chaque expérience, on fait une lecture qui indique le zéro de la série, et puis deux lectures pour chaque charge effective P, l'une pendant et l'autre après son application ; la différence entre la position initiale et cette dernière donne l'angle de la torsion permanente, tandis que la différence entre les deux angles observés en dernier lieu mesure l'angle temporaire qui correspond à chaque couple.

Les valeurs de ces angles qui se trouvent inscrites dans les tableaux ci-joints, sont les moyennes des valeurs peu différentes entre elles que l'on a obtenues par les torsions dextrorsum et sinistrorsum. Il est inutile sans doute de faire remarquer que l'on a eu égard à l'inertie de la roue et que l'on n'a considéré comme positions d'équilibre que les positions où le moindre déplacement dans le sens de la torsion rendait le moment de la résistance supérieur à celui du couple ; en vertu de cette même inertie, les points de départ de deux expériences correspondantes, faites l'une vers la droite, l'autre vers la gauche, ne tombent jamais rigoureusement sur la même division. Enfin les poids des crochets et des parties verticales non équilibrées des cordes sont compris dans les poids P.

V. — Nous avons dû nous occuper de la vérification de l'hypothèse suivant laquelle les différents points appartenant à une même section n'éprouveraient aucun déplacement relatif dans les deux directions transversales. Ces deplacements sont certainement trop petits pour être directement mesurables ; mais s'ils existent contrairement à la théorie que nous venons de rappeler, ils produiront d'un côté des changements de volume que nous pourrons mesurer, et de l'autre côté des phénomènes optiques que l'on observerait en tordant un prisme de verre.

Le changement de volume a été mesuré suivant la méthode proposée par M. Regnault, et qui consiste dans l'em-

Digitized by Google

ploi de pièces creuses remplies de liquide et munies de tubes en verre d'une très-petite capacité intérieure. Ces expériences très-délicates exigent des précautions particulières, afin de s'assurer que le changement de volume observé provient uniquement de la torsion de la partie du cylindre ou du prisme qui est limitée par les deux points d'encastrement, qu'elle est indépendante de la pression qui s'exerce sur ces points et même de l'accroissement de pression qui a lieu par suite de l'application du couple.

Chaque tube est fermé aux deux extrémités par deux cubes de même matière que le prisme et de dimensions assez considérables pour qu'ils remplissent toute la cavité intérieure des étaux. Les extrémités de ce prisme creux sont emboîtées, chevillées et soudées dans ces cubes, de telle sorte que les parties centrales de ceux-ci forment des bouchons qui entrent à frottement dur dans la cavité du tube, et la ferment hermétiquement.

Après l'assemblage, les cubes qui seuls sont comprimés dans les étaux, ne contiennent aucune cavité intérieure de quelque importance, et tout le changement de volume que l'on observe se rapporte à la cavité intérieure du tube *s*, *fig.* 1 et 3, qui éprouve les effets de la torsion. Le cube antérieur *t* est complétement fermé, et celui de l'autre extrémité *t'* est seulement traversé d'un étroit conduit qui fait communiquer entre elles les cavités intérieures du tube lui-même et du tube capillaire *u*, dans lequel on observe le déplacement du niveau du liquide ; ce dernier tube est divisé en parties d'égale capacité et passe en dehors de l'étau.

Dès que l'on applique un couple, on observe un déplacement du niveau qui donnerait immédiatement la mesure du changement de volume, s'il n'y avait les complications qui proviennent soit des changements continuels de température, soit de la difficulté qu'éprouve la colonne à se mouvoir dans les tubes généralement très-déliés que l'on est

Digitized by Google

obligé d'employer. On élimine la première de ces causes d'erreur par un moyen que j'ai déjà indiqué dans un précédent Mémoire : le réchauffement ou le refroidissement pouvant être considéré comme uniforme pendant la courte durée de l'expérience et les changements de niveau qui auraient lieu par le seul effet de la torsion et de la détorsion étant nécessairement égaux entre eux et de signe contraire, la moyenne entre les déplacements absolus observés pendant ces deux périodes de l'expérience se trouve corrigée de la perturbation thermique, pourvu que ces deux périodes aient eu la même durée, condition qu'il a été facile de remplir en se servant d'un compteur. Du reste, la plupart de ces expériences ont été faites dans les caves du Conservatoire des Arts et Métiers, dans lesquelles la température n'éprouve que des variations lentes et peu sensibles; nos tableaux ne contiennent que les résultats corrigés d'après cette méthode.

Il est beaucoup plus difficile de s'affranchir de la seconde cause d'erreur, on n'y arrive même jamais d'une manière complète; l'adhésion de la colonne liquide et son frottement contre les parois du tube capillaire tendent constamment à en diminuer les déplacements ; il est à remarquer même que la surface capillaire du liquide a beaucoup perdu de sa mobilité dès qu'elle a séjourné pendant quelque temps à la même place; alors une espèce d'imbibition paraît avoir eu lieu, dont l'effet ne peut être surmonté que par une force relativement considérable. Ces circonstances m'ont obligé à répéter un grand nombre de fois chacune des expériences, et à combiner avec chaque tube creux successivement des tubes capillaires de diamètres intérieurs aussi différents que possible; parmi ces derniers, ceux dont le diamètre est très-petit donnent des déplacements absolus plus considérables, et font apercevoir plus facilement quel est pour un tube creux donné le rapport entre les torsions et les changements de volume; ceux au contraire dont les

Digitized by Google

diamètres intérieurs sont relativement grands, fournissent des résultats moins viciés par cette cause d'erreur, et par conséquent plus aptes à servir à la comparaison des différents tubes entre eux, et en même temps ils font voir, du moins approximativement, quelle peut être la grandeur de l'erreur commise.

Sur les augmentations de volume produites par l'allongement.

VI. — Nous avons rappelé tout à l'heure les modifications que l'on a dû apporter aux constantes qui entrent dans les équations générales de l'équilibre et du mouvement des corps homogènes, par suite de la détermination précise du changement de volume, dont l'allongement d'un pareil corps élastique est accompagné; ce point est tellement fondamental, que l'on ne saurait assez varier les expériences afin de vérifier la loi que j'en ai déduite. Il était notamment désirable, ainsi que je l'ai fait remarquer dans mon Mémoire sur ce sujet (*Annales de Chimie et de Physique*, tome XXIII, pages 73 et 95), de les étendre au plus grand nombre possible de substances homogènes; malheureusement le fer, le cuivre jaune et le verre sont à peu près les seules substances qui ne soient ou trop molles ou d'un prix trop élevé pour pouvoir être employées à cet effet. J'ai profité de la construction des tubes creux que je viens de décrire, pour les soumettre aux expériences d'allongement avant qu'ils eussent éprouvé aucun effet de la torsion. En voici les résultats :

Digitized by Google

Résultats moyens tirés des tableaux V, VI, VII.

	NUMÉRO de la pièce.	LONGUEUR L.	SECTION de la paroi s.	SECTION de la cavité intérieure s_1.	POUR UNE CHARGE DE 1 KILOGRAMME par millimètre carré		
					Allongement ΔL.	Augmentation de volume	
						calculée.	trouvée.
Cylindres en cuivre jaune.	53	950,60	101,784	315,500	0,08708	9,1575	8,1224
	54	666,18	80,601	77,143	0,06379	1,6554	1,5443
	55	959,00	51,152	28,871	0,09333	0,8981	0,8466
	7	899,58	79,476	19,113	0,09308	0,5930	0,5610(1)
	8	897,75	46,046	19,292	0,09109	0,5858	0,5436(1)
	9	899,50	23,722	19,182	0,08450	0,5403	0,5202(1)
Prismes en cuivre jaune.	56	937,28	95,440	102,214	0,09062	3,0875	3,1075
	57	925,05	89,070	101,585	0,08749	2,9627	3,0604
	58	920,70	117,140	99,313	0,09371	3,1023	3,1312
Cylindres en fer (tôle).	59	933,31	79,160	176,730	0,05336	3,1434	3,6231
	60	456,65	40,693	103,040	0,02432(2)	0,8353	1,1288
	61	962,08	19,655	49,448	0,05124	0,8446	1,2937

(1) Ces trois lignes sont empruntées aux expériences que j'ai déjà publiées.

(2) Cet allongement n'a pas pu être mesuré à cause de la trop petite longueur de la pièce; on l'a calculé en supposant que le coefficient d'élasticité de ce tube est égal à celui du tube 61.

L'avant dernière colonne a été calculée d'après la loi exprimée par la formule

$$\Delta u = \frac{1}{3}\,\frac{\Delta L}{L}\,u = \frac{1}{3}\,\Delta L.s_1,$$

et l'on voit que pour tous les cylindres en cuivre jaune la valeur calculée est un peu plus grande que celle trouvée par l'expérience : la plus grande différence a lieu pour le plus gros de ces cylindres;

Que l'accord entre ces deux valeurs est, dans les prismes en cuivre jaune, aussi satisfaisant qu'on peut le désirer;

Que les cylindres en fer éprouvent au contraire un changement de volume notablement plus grand que celui qui résulte de notre formule.

Digitized by Google

Il est évident, et les expériences sur la torsion elles-mêmes prouveront que ces différences doivent être attribuées à l'inégalité des axes d'élasticité qui, malgré le recuit, persiste dans les métaux ouvrés ; mais dans l'état actuel de nos connaissances nous pouvons en tirer seulement cette conséquence, que l'étirage sous forme rectangulaire n'altère pas et que l'étirage sous forme cylindrique altère peu l'homogénéité du cuivre jaune, tandis que le fer de nos tubes a complétement cessé d'être un corps homogène.

Ce n'est pas uniquement à l'étirage qu'il faut attribuer le défaut d'homogénéité de ces derniers : pour les fabriquer on choisit une bonne plaque de tôle que l'on emboutit à coups de marteau de manière à y former une espèce de dé, dont on coupe le fond pour étirer en tube la partie cylindrique qui reste ; il faudrait donc supposer que ce laminage entre la filière extérieure et le mandrin intérieur non-seulement ne fait naître aucune différence d'élasticité, mais qu'il suffit même pour faire disparaître celles qui préexistent dans la tôle : en effet, j'ai fait voir ailleurs que les deux axes mêmes qui sont parallèles aux faces d'une plaque laminée ne sont pas rigoureusement égaux entre eux. Mais il peut y avoir une différence beaucoup plus considérable entre ces deux axes et celui qui est perpendiculaire aux deux faces ; suivant cette direction, qui, dans le tube étiré, devient précisément la direction du rayon, la matière éprouve toute la compression ; c'est dans ce sens aussi que sont superposées les couches ou lames dont se compose chaque feuille de tôle et qui sont souvent bien moins exactement réunies et soudées qu'on ne le suppose : ce défaut existe même dans mes tubes, malgré le soin avec lequel ils ont été travaillés. En effet, frappé du résultat anormal qu'avait fourni le dernier de ces tubes, je l'ai fait scier transversalement, et je me suis convaincu que l'on pouvait à l'aide d'une pince le dédoubler presque dans toute sa longueur. Nous ne pouvons donc pas admettre que l'é-

Digitized by Google

lasticité est dans ce sens égale à celles qui existent suivant les deux directions qui lui sont perpendiculaires, mais nous n'avons aucun moyen direct pour en déterminer la grandeur.

Nos expériences fourniraient un moyen pour faire cette détermination si la théorie de l'élasticité des corps à trois axes était plus avancée qu'elle ne l'est actuellement. Cette question se reproduira lorsque nous aurons à parler de la torsion de ces corps ; je crois donc devoir entrer dans quelques détails à cet égard.

Conservons les notations de M. Cauchy que nous avons employées dans le Mémoire déjà cité; on a pour les composantes normales et tangentielles dans un corps à trois axes les expressions suivantes :

$$(1)\qquad \begin{cases} P_3 = (L+G)\dfrac{d\xi}{dx} + (R-G)\dfrac{d\eta}{dy} + (Q-G)\dfrac{d\zeta}{dz}, \\ Q_2 = (R-H)\dfrac{d\xi}{dx} + (M+H)\dfrac{d\eta}{dy} + (P-H)\dfrac{d\zeta}{dz}, \\ R_1 = (Q-I)\dfrac{d\xi}{dx} + (P-I)\dfrac{d\eta}{dy} + (N+I)\dfrac{d\zeta}{dz}. \end{cases}$$

$$(2)\qquad \begin{cases} P_1 = R_3 = (Q+G)\dfrac{d\zeta}{dx} + (Q+I)\dfrac{d\xi}{dz}, \\ P_2 = Q_3 = (R+H)\dfrac{d\xi}{dy} + (R+G)\dfrac{d\eta}{dx}, \\ Q_1 = R_2 = (P+I)\dfrac{d\eta}{dz} + (P+H)\dfrac{d\zeta}{dy}, \end{cases}$$

auxquelles il faut ajouter la valeur du changement de volume

$$(3)\qquad v = \frac{d\xi}{dx} + \frac{d\eta}{dy} + \frac{d\zeta}{dz}.$$

On simplifie habituellement ces formules en supposant que les quantités G, H, I sont négligeables par rapport aux quantités L, M, N, et P, Q, R ; mais soit que l'on arrive à cette supposition par la considération des fonctions

Digitized by Google

G, H et I elles-mêmes, soit que l'on y ait été conduit par les conditions que l'on admet comme nécessaires pour l'équilibre du corps dans son état primitif, toujours est-il qu'elle est démentie par les faits observés sur des corps homogènes. On est donc obligé de conserver ces quantités, et nous ignorons absolument quels sont les rapports entre les coefficients d'élasticité E, E′ et E″ et les neuf constantes contenues dans les formules (1) et (2); nous savons seulement que dans le cas d'un corps homogène où l'on a

$$G = H = I, \qquad P = Q = R, \qquad L = M = N,$$

on a également

$$L = 3P = -9G.$$

On pourrait supposer qu'il existe une relation analogue dans les corps à trois axes et que l'on aurait

$$(4) \quad L = 3P = -9G, \quad M = 3Q = -9H, \quad N = 3R = -9I.$$

mais cette hypothèse conduirait à des conséquences inadmissibles.

En effet, supposons que l'on ait appliqué à l'un de ces corps une force principale qui y produise un allongement $\frac{d\xi}{dx} = \varepsilon$, on aura les équations de condition $Q_1 = 0$, $R_1 = 0$, dont on tirera les valeurs de $\frac{d\eta}{dy}$ et $\frac{d\zeta}{dz}$, lesquelles substituées dans l'équation (3) donnent l'équation

$$v = \varepsilon\left\{1 + \frac{(R-H)[(P-I)-(N+I)] + (Q-I)[(P-H)-(M+H)]}{(M+H)(N+I) - (P-H)(P-I)}\right\}.$$

Soient $Q = aP$, $R = bP$, et substituons à la place de M, N, H et I leurs valeurs tirées des équations (4), nous aurons l'expression

$$v = \varepsilon\left[1 + \frac{(3b+a)(3-7b) + (3a+b) + (3-7a)}{64ab - (3+a)(3+b)}\right].$$

D'après cette équation, le changement de volume serait

Digitized by Google

égal à l'allongement lorsque l'on aurait $a = b = \frac{1}{7}$; et même il deviendrait infiniment grand pour toutes les paires de racines de l'équation

$$64ab - (3 + a)(3 + b) = 0,$$

qui n'annulent pas le numérateur de la fraction.

Ces incertitudes ne pourraient être levées qu'au moyen d'expériences directes sur les changements de volume qu'éprouvent des corps à trois axes, dont les trois coefficients d'élasticité auraient été préalablement déterminés ; mais des expériences de ce genre sont encore actuellement inabordables.

On verra plus loin quelle est sur les angles de torsion et sur les changements de volume qui accompagnent la torsion, l'influence du défaut d'homogénéité que nous venons de signaler ; mais nous devons faire remarquer en outre que toutes nos expériences sur les tubes creux en tôle paraissent être entachées d'erreurs qui proviennent de la nature du liquide employé. En effet, le mercure aurait attaqué les soudures, et l'huile aurait dissous le mastic au moyen duquel le tube capillaire est fixé ; je me suis donc servi d'une dissolution alcaline très-faible, dont j'ai rempli les tubes bien décapés à l'intérieur. Ces dissolutions préservent le fer de la rouille, mais on ignore quel est le genre d'action mutuelle qu'exercent l'un sur l'autre le fer et la dissolution, et si cette action prolongée ne fait pas subir un changement de volume au liquide lui-même ; je suis porté à croire qu'une perturbation provenant de cette dernière cause a réellement lieu, puisque le liquide ne cesse pas de baisser d'une manière lente, mais continue, plusieurs heures même après que le tube en a été rempli.

Sur les effets optiques produits par la torsion.

VII. — Ce moyen d'investigation ne m'a pas rendu les services que j'en espérais, et je le passerais entièrement

Digitized by Google

sous silence si je ne tenais à faire connaître quelques faits et à signaler les difficultés qui m'ont arrêté; ces difficultés consistent dans le choix de la matière et du mode d'application de la force.

En effet, il faut que la substance soit assez transparente pour que l'on puisse observer à travers un prisme de 30 à 40 centimètres au moins, assez homogène pour que dans l'état d'équilibre naturel elle n'exerce aucune action sur la lumière polarisée, assez dure enfin pour que l'on puisse y provoquer des réactions élastiques sensibles. La gelée de colle de poisson qui a été proposée pour cet usage par M. Maxwell (*) ne remplit pas ces conditions; sans parler de sa transparence toujours imparfaite sur une grande épaisseur, et de sa couleur jaune, elle manque de l'homogénéité nécessaire: étant fraîchement préparée, elle est trop molle; desséchée en dehors du moule, elle se compose de couches concentriques dont la densité et la consistance décroissent de la surface au centre; si au contraire on la laisse se durcir dans le moule, elle adhère aux parois, et les parties intérieures se trouvent dans un état de dilatation forcée qui donne lieu aux phénomènes optiques que M. Brewster (**) a fait connaître le premier. Il ne me restait donc qu'à employer du verre; le verre ordinaire, soit étiré, soit coulé, est impropre à cet usage à cause des nombreuses stries qu'il présente dans le sens de sa plus grande longueur; mais au moyen du refoulement on a réussi à mouler des prismes en flint de Guinand et en crown de Clichy, d'une pureté remarquable malgré leurs grandes dimensions (20 à 40 centimètres de longueur sur 1 à 3 centimètres de côté). Ces prismes ont été assez lentement recuits pour qu'ils n'aient conservé que très-peu de trempe, et malgré la grande longueur de verre que la lumière po-

(*) *Edinburgh Transactions*, tome XX, 1re partie.
(**) *Philosophical Transactions*, année 1816.

Digitized by Google

larisée est obligée de parcourir, ils présentent une croix assez pâle et assez diffuse pour que le centre puisse être considéré comme étant à l'état de substance isotrope.

Pour pouvoir appliquer la force, j'avais essayé de mastiquer simplement les verres dans des pièces en fer, percées d'un canal central, lesquelles étant placées dans les étaux eussent supporté toute la pression des vis ; malheureusement le mastic rouge, qui résiste si bien aux pressions et aux tractions, se détache sous un effort de torsion relativement faible et encore insuffisant pour produire des effets optiques sensibles. Il a donc fallu encastrer directement les extrémités des prismes après les avoir garnies de caoutchouc et de carton ; seulement on a eu soin de faire agir les deux pressions suivant la même direction, et de faire coïncider celle-ci avec le plan de polarisation de la lumière incidente : de cette manière la croix noire devient plus prononcée, il est vrai, comme si la trempe avait augmenté, mais du moins la substance reste monoréfringente suivant le plan des vibrations lumineuses, et comme les angles de torsion sont forcément petits, la section principale de l'extrémité tordue elle-même ne s'écarte pas sensiblement de ce plan ; il en résulte que les effets chromatiques que l'on observe pendant la torsion ne peuvent pas être confondus avec ceux qui proviennent de la compression des extrémités.

Par conséquent, l'appareil a été modifié de la manière suivante : les extrémités du prisme de verre v, *fig.* 4, dont les faces terminales sont polies, et les faces latérales dépolies ou même noircies, sont fixées dans deux pièces en bois de buis qui se placent elles-mêmes dans les coussinets des deux chariots d et e, de telle sorte que l'axe du prisme coïncide avec les axes de deux nicols dont les sections principales sont croisées, et qui servent l'un x comme polariseur et l'autre z comme analyseur.

L'une de ces pièces y sert à l'encastrement fixe de l'une

Digitized by Google

des extrémités ; elle se compose de deux demi-cylindres évidés de manière à former ensemble un canal intérieur rectangulaire dont la hauteur est un peu moindre que celle du prisme qu'il est destiné à recevoir ; par conséquent, cette extrémité n'est comprimée que dans le sens vertical lorsque l'on serre les vis du coussinet e. L'autre pièce se compose d'un cylindre α qui est percé d'un canal central et qui, formant tourillon, roule dans le coussinet de d et d'un cylindre b d'un diamètre plus grand ; ce dernier porte deux vis en bois placées verticalement γ, et un levier en fer δ au moyen duquel on exerce la torsion alternativement vers la droite et vers la gauche.

Tout étant ainsi disposé, si l'on fait passer un rayon de lumière blanche à travers l'axe du prisme et qu'on lui imprime en même temps des torsions successivement croissantes, on voit le centre noir s'éclairer graduellement et devenir enfin tout à fait blanc, quel que soit du reste le sens de la torsion. Pour mieux étudier le phénomène, on place sur le trajet du rayon, entre le polariseur x et l'extrémité y du prisme, une lame biréfringente donnant la teinte sensible ; alors, en tordant dextrorsum, on voit la teinte au centre monter jusqu'au bleu et au vert, et en tordant sinistrorsum on la voit descendre au rouge et au jaune ; l'inverse a lieu lorsque l'on a fait tourner la lame biréfringente de 90 degrés autour du rayon considéré comme axe.

L'effet opposé des torsions appliquées en sens contraire m'avait fait considérer pendant longtemps cette expérience comme la preuve d'une rotation du plan de polarisation produite par la torsion, et, pour bien comprendre qu'il n'en est pas ainsi, il faut se rappeler quelle est la constitution optique d'un cylindre ou prisme de verre trempé ou du moins imparfaitement recuit. Ainsi que l'a fait voir M. Dove (*), un pareil verre est partagé par la croix noire

(*) *Annales de Poggendorff*, tome XXXV.

Digitized by Google

en quatre secteurs ou rectangles qui ont deux à deux la même action sur la lumière polarisée : deux secteurs placés sur la même diagonale agissent comme des cristaux positifs et donnent par exemple du vert, *fig.* 5, tandis que ceux qui sont placés sur l'autre diagonale agissent à la manière des cristaux négatifs et font descendre la teinte au jaune (*j*). Maintenant lorsque l'on fait tourner le verre autour du rayon comme axe, vers la droite ou vers la gauche, sans déplacer la lame colorante, on voit les bras de la croix se courber et tendre vers les positions que nous avons indiquées par des lignes ponctuées, *fig.* 5, *d* et *g*; mais contrairement à la description habituelle ses bras courbes finissent par se séparer vers le centre, et lorsque la section principale du verre fait un angle d'environ 45 degrés avec le plan primitif de polarisation, ils sont confondus en deux courbes *mno* qui partagent le champ en trois parties; les deux parties qui sont comprises chacune entre une courbe et un côté du prisme présentent la même coloration, tandis que la couleur des deux secteurs opposés, *j fig.* 5 *d*, *v fig.* 5 *g*, s'est étendue sur le centre, et occupe d'une manière presque uniforme toute la partie intermédiaire du champ; en résumé, la teinte du centre qui avait été primitivement la teinte sensible monte au jaune lorsque l'on tourne le prisme de 45 degrés vers la droite, et descend au vert lorsqu'on le fait tourner du même angle vers la gauche.

La torsion produit des effets tout à fait analogues à ceux-ci, quoique la section principale d'aucune partie du prisme ne fasse un angle sensible avec le plan de polarisation; seulement les bras de la croix se séparent immédiatement par le centre au lieu de se courber, et forment deux arcs de cercle ou plutôt d'hyperbole *pq* qui s'écartent l'un de l'autre à mesure que la torsion augmente; par suite, la couleur des secteurs opposés s'étend jusqu'au centre comme dans le cas précédent: on aura donc un centre jaune lorsque l'on

Digitized by Google

tord vers la droite, *fig.* 5 *d*, et un centre vert lorsque l'on exerce la torsion vers la gauche, *fig.* 5 *g*.

Ces expériences prouvent qu'il s'agit seulement d'une double réfraction ordinaire qui devient positive ou négative selon que la torsion a lieu vers la droite ou vers la gauche ; on ne peut rien en conclure en ce qui concerne un corps parfaitement homogène, et elles ne peuvent servir ni à confirmer ni à infirmer les prévisions de l'analyse de M. Neumann (*).

Les phénomènes sont plus compliqués et peut-être plus instructifs lorsque le rayon incident est doué de la polarisation circulaire : c'est une question étrangère au sujet actuel et sur laquelle j'aurai l'occasion de revenir.

Sur quelques faits généraux et indépendants de la forme de la section transversale.

VIII. — Avant d'entrer dans le détail des résultats relatifs à l'influence de la forme de la section, il sera bon de résumer nos tableaux en général et de faire ressortir quelques-uns des effets de la torsion que l'on remarque indistinctement dans toutes les pièces, quelle que soit leur forme.

1. En parcourant nos tableaux on voit que dans chaque angle de torsion total on peut distinguer deux parties dont l'une, désignée par ψ_1, est purement *temporaire*, tandis que l'autre θ *persiste* lors même que le couple a cessé d'agir ; l'effet secondaire découvert par M. Weber, et qui est insensible dans l'allongement des métaux, ne l'est plus dans les expériences beaucoup plus délicates que l'on peut faire au moyen de la torsion ; cependant ses effets se confondent avec ceux des oscillations tournantes que la barre exécute autour de chaque position d'équilibre avant de revenir au repos.

On ne peut assigner ni une limite où les angles perma-

(*) *Mémoires de l'Académie de Berlin*, année 1841, 2e partie.

Digitized by Google

nents commenceraient à devenir sensibles, ni un rapport fixe quelconque entre les angles des deux espèces ; l'angle permanent augmente avec la longueur de la pièce et avec les moments des couples, mais, au lieu de leur être proportionnel, il augmente d'abord très-lentement, ensuite de plus en plus rapidement, jusqu'à ce qu'enfin la barre ou se rompe ou se mette à *filer*, ce qui ne permet plus de déterminer la véritable valeur de cet angle.

2. *Les angles temporaires ne sont pas rigoureusement proportionnels aux moments des couples appliqués.*

Nous avons inscrit dans la quatrième colonne de nos tableaux l'angle temporaire moyen $\frac{\psi_1}{p}$, qui serait constant si la loi de proportionnalité était rigoureusement vraie ; on voit au contraire qu'il augmente jusqu'à la rupture dans les corps roides, et jusqu'à atteindre un maximum dans les corps qui se déforment d'une manière sensible : donc en prenant pour abscisses les poids qui constituent les couples et pour ordonnées les angles temporaires correspondants, on obtient une courbe dont la convexité est tournée du côté de l'axe des abscisses, qui diffère généralement peu d'une ligne droite et qui, pour les corps mous, finit par se confondre avec une droite, pour ensuite se transformer en une courbe dont la concavité est tournée du côté de l'axe des abscisses.

L'augmentation graduelle de l'angle moyen, qui est un fait général pour les corps roides aussi bien que pour les corps mous, provient de deux causes : la première se trouve dans les lois mêmes de l'allongement de ces corps homogènes ; des procédés plus délicats que ceux que l'on emploie habituellement (*) ont fait voir que les allongements successifs sont représentés par une courbe analogue à celle que nous venons de trouver pour les angles de torsion : or on verra

(*) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, tome XL, page 195.

Digitized by Google

plus loin que la torsion telle que nous pouvons la réaliser dans nos expériences est nécessairement accompagnée d'un effort de traction.

Une autre cause plus importante peut-être de cette marche ascendante de l'angle moyen se trouve dans la contraction transversale successivement croissante qu'éprouvent les différentes sections de la pièce tordue, et qui fait que le moment de résistance de toute la pièce, au lieu d'être constant, diminue incessamment, de sorte que pour établir l'équation d'équilibre de la pièce sous l'action d'un couple quelconque, il faudrait y introduire, à la place des moments d'inertie des sections dans leur état primitif, ceux des sections modifiées par la torsion; et quoique ce calcul ne puisse pas encore être effectué pour des raisons que nous exposerons plus loin, on voit cependant que la contraction des sections doit faire diminuer leur moment de résistance et augmenter par conséquent les angles moyens de torsion.

Le point de rebroussement que l'on observe dans les corps mous provient des changements de forme permanents qu'ils ont déjà subis, et sur lesquels nous reviendrons en parlant de la rupture.

3. *Les angles moyens ne sont pas rigoureusement proportionnels aux longueurs.*

Pour prouver cette proposition, nous allons résumer nos résultats sur la torsion de chaque pièce sous des longueurs différentes, en faisant remarquer qu'ayant employé constamment les mêmes poids pour toutes les longueurs d'une même pièce, nous pourrons pour cette comparaison nous servir des moyennes générales des valeurs de $\frac{\psi_1}{p}$; car toutes les observations qui fournissent des moyennes correspondantes sont également correspondantes entre elles et ont subi de la même manière l'accroissement continu que nous

Digitized by Google

venons de signaler. Le tableau suivant contient les angles moyens ψ calculés pour une charge $p = 1$ kilogramme et pour une longueur de 1 mètre, en supposant que la loi de la proportionnalité entre les angles et les longueurs serait rigoureusement exacte.

Résultats relatifs à l'influence de la longueur tirés des tableaux I à IV et VIII.

NUMÉRO de la pièce.	SUBSTANCE.	FIGURE de la section.	ANGLE ψ d'après les expériences faites avec une longueur de		
			1m	0m,5	0m,25
			° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
1	Fer.....	Cercle...	0.17.44,8	0.17.50,2	0.18. 1,4
2	Id.....	Id.....	1.26.44,4	1.25.48,6	1.26.31,0
3	Acier fondu.....	Id	1 49.40,9	1.51.43,0	1.52.16,4
4	Cuivre jaune.....	Id.....	3.51. 0,4	3.53.23,6	3.57.54,0
11	Acier fondu.....	Ellipse...	2. 6.15,2	2.11.35,6	2.14.55,4
12	Id.....	Id.....	4.10.40,8	4.13.47,6	4.15.26,3
13	Cuivre jaune....	Id.....	4.30.32,4	4.28.47,0	4.32.44,3
14	Id.....	Id.....	8.53.53,6	8.52.50,6	8.56.57,6
16	Fer.....	Carré....	0. 5.13,8	"	0. 5.18,4
23	Id.....	Rectangle	4. 8.57,9	4.12 28,8	"
24	Id.....	Id.....	"	10.56.43,0	10.59.17,2
25	Id.....	Id.....	"	29.39.59,2	30.11.36,4
27	Id.....	Carré....	1. 2.30,0	1. 2.47,0	"
28	Id.....	Id.....	"	20.44. 2,3	21. 2.14,4
29	Id.....	Rectangle	14 36 32,4	14.30.41,4	"
30	Tôle.....	Id.....	16. 3.29,9	16.29.18,5	16.20.57,6
31	Acier fondu.....	Carré....	10.12 1,4	10.10.43,8	10.12.12,7
32	Id.....	Rectangle	12.28. 9,3	12.34.32,0	12,37.12,8
33	Id.....	Id.....	19.46. 3,1	19.42.24,5	19.51.39,6
34	Id.....	Id.....	37.12.29,7	34.43.33,6	37.11.45,6
35	Id.....	Id.....	"	103.27.44,7	99. 0.19,5
36	Acier Huntsman.	Id.....	1. 5. 7,4	1. 5.14,9	"
38	Cuivre jaune.....	Id.....	13.10.31,2	13.16.52,6	13.25.51,2
48	Verre.....	Id.....	1.11.49,4	1.10.38,5	"
62	Bois de chêne....	Carré....	6. 8. 0,0	6.13.53,4	6.12. 8,2
63	Bois de sapin....	Id.....	"	120.35.31,5	125.17.45,6
64	Bois de chêne....	Rectangle	109.14.37,0	115.53.37,7	119.43.41,5
65	Bois de sapin....	Id.....	199.57.24,8	193. 1.32,9	204.49.30,7

Digitized by Google

On voit que l'angle moyen diminue à mesure qu'augmente la longueur sur laquelle on opère; les exceptions en petit nombre que présentent nos tableaux portent précisément sur des lames très-minces telles que les pièces 26 et 35, qui sont trop faibles par rapport à l'inertie et au frottement de notre roue pour que la détermination de leurs angles de torsion soit susceptible d'une grande exactitude. Cet angle moyen tend évidemment vers une limite que l'on n'atteindra que lorsque la longueur sera effectivement telle qu'on la suppose dans le calcul, c'est-à-dire infiniment grande par rapport aux dimensions transversales : en employant des longueurs égales entre elles, on sera d'autant plus éloigné de cette limite que ces dernières dimensions seront plus considérables; on voit donc que l'on en est fort éloigné pour toutes les pièces usuelles.

On ne s'étonnera pas de ce que ces faits (2 et 3) ont échappé jusqu'ici aux expérimentateurs, si l'on se rappelle que nous ne possédons sur ce sujet que deux recherches faites au point de vue de la théorie, dont l'une, celle de Coulomb, n'a porté que sur des fils minces et relativement très-longs, tandis que l'autre a effectivement donné des résultats conformes aux nôtres, mais que Savart a cru devoir négliger comme provenant du peu de fixité de son point d'encastrement.

4. *La cavité intérieure de tout corps homogène creux*, quelles que soient sa forme et ses dimensions, *diminue par l'effet de la torsion*, et cette diminution est proportionnelle à la longueur et au carré de l'angle de torsion rapporté à l'unité de longueur (tabl. V à VII); nous pouvons ici nous servir de cette dernière quantité, et de même nous pouvons employer indistinctement soit la charge p, soit l'angle ψ_1, parce que les changements de volume sont beaucoup trop petits pour que les différences que nous venons de signaler pussent s'y faire sentir.

Digitized by Google

Sur la torsion des cylindres à base circulaire.

IX. — La torsion du cylindre à base circulaire constitue évidemment le cas le plus simple : toutes les sections transversales sont égales entre elles, et les déplacements de chaque point, quels qu'ils soient du reste, sont indépendants de la position de ce point par rapport à un méridien fixe arbitrairement choisi. Nous ne connaissons d'avance ni tous les déplacements ni toutes les forces appliquées; c'est pourquoi nous nous occuperons d'abord de la détermination de la diminution du volume, laquelle étant fonction des déplacements nous fournira au moins une équation entre les angles de torsion et les différentielles des déplacements.

En appelant φ l'angle de torsion de la partie creuse exprimée en longueur d'arc du rayon 1, et α l'angle de torsion par rapport à l'unité de longueur, on aura $\frac{\varphi}{l_1} = \alpha, \psi = \frac{180}{\pi}\varphi$. Nous venons de voir que l'expression de la diminution de volume $-\delta u$ contient généralement les facteurs l_1 (*) et α^2, donc elle contiendra le terme $\frac{\pi^2}{180^2}\frac{\psi^2}{l_1}$: je dis maintenant qu'elle contient en outre, lorsqu'il s'agit d'un cylindre circulaire, le facteur πr^4; de sorte que nous aurons l'équation

$$(5) \qquad \delta u = -\pi r_1^4 \alpha^2 l_1 = -\frac{\pi^3}{180^2} r_1^4 \frac{\psi^2}{l_1}.$$

Mais on a $\pi r_1^2 l_1 = u$, le volume primitif; donc

$$(6) \qquad \frac{\delta u}{u} = -r_1^2 \alpha^2.$$

Le suivant résumé de nos expériences prouvera l'exactitude de cette formule.

(*) Nous désignons par l la longueur du cylindre et par l_1 celle de sa cavité intérieure; en général ces deux longueurs étaient égales entre elles dans nos expériences.

Digitized by Google

Résumé des expériences sur la diminution de volume produite par la torsion des cylindres à base circulaire en cuivre jaune. (Tableau n° V.)

NUMÉRO de la pièce.	ÉPAISSEUR de la paroi. e.	LONGUEUR. l_1.	RAYON INTÉRIEUR. r_1.	ANGLE DE TORSION moyen. $\frac{\psi_1}{p}$.	DIMINUTION MOYENNE DU VOLUME : $-\delta u$.		
					Calculée.	Trouvée.	Trouvée pour $\frac{\psi_1}{p}=1$ et $l_1=1000$
53	1,504	1000,00	10,021	0°.20′. 0″,6	0,0010734	0,0010484	0,0094262
54	2,131	715,56	4,955	0.55. 0,8	0,0006777	0,0006512	0,0005543
55	2,0155	1012,00	3,0315	4. 9.52,2	0,0013851	0,0014905	0,0000870

Digitized by Google

Les chiffres de la sixième et de la septième colonnes s'accordent entre eux aussi bien que l'on peut le désirer; il n'y a de différence sensible que pour le dernier tube, et cette différence même disparaît lorsqu'à la moyenne des changements de volume trouvés avec deux tubes capillaires de différents diamètres, on substitue le nombre 0,001390 qui mérite réellement le plus de confiance, puisqu'il provient de mesures faites avec le plus large de ces deux tubes.

La dernière colonne contient les diminutions de volume trouvées et ramenées à ce qu'elles seraient si tous les tubes avaient la même longueur de 1 mètre, et éprouvaient une torsion de 1 degré; elles sont données par l'expression $\delta u \frac{l_1}{1000} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\psi_1}{p}\right)^2}$, δu étant les valeurs inscrites dans la septième colonne : les nombres de cette huitième colonne sont destinés à faire voir du premier coup d'œil que, tout étant égal du reste, les changements de volume sont proportionnels aux puissances quatrièmes des rayons.

Nous ferons ici une remarque qui s'applique également à tous les résumés qui vont suivre ; nous y avons toujours inscrit la valeur moyenne de l'angle de torsion ou, ce qui est la même chose, sa valeur pour $p = 1$: il s'ensuit que les valeurs absolues des angles et des changements de volume correspondants sont généralement très-petites et pourraient paraître ne pas présenter toute la certitude désirable. Mais il faudra se rappeler que dans les expériences elles-mêmes p croît continuellement, et qu'il suffit d'avoir seulement $p = 10$ pour que les angles soient égaux à dix fois et les changements de volume égaux à cent fois leurs valeurs moyennes; des différences insignifiantes en apparence et des quantités infiniment petites deviennent alors les unes très-importantes et les autres parfaitement mesurables.

X. — Jusqu'ici nous nous sommes tenu strictement dans

Digitized by Google

les limites des expériences ; il faudra maintenant chercher à interpréter les résultats acquis et à en tirer toutes les conséquences qui peuvent avoir de l'influence sur la théorie.

Il se présente d'abord la question de savoir si, ainsi que nous le supposons, la diminution de volume que nous venons de trouver représente réellement celle qu'aurait éprouvée un cylindre solide de même matière que la paroi du tube, de dimensions telles, qu'il remplit toute la cavité intérieure de celui-ci, et qui aurait été soumis à la même torsion temporaire? L'affirmative ne me semble pas douteuse : d'après notre formule, les déplacements de l'anneau du rayon r_1 sont indépendants de l'épaisseur de la paroi ; ils ont donc lieu comme s'il n'y avait nulle réaction entre cette couche et toutes celles d'un plus grand rayon. Mais ce qui est vrai pour cet anneau est également vrai pour tout anneau d'un rayon moindre que r_1, et puisque les déplacements de la couche r_1 restent les mêmes, que la couche $r_1 + \rho$ fasse ou non partie du cylindre, la même chose sera vraie pour la couche concentrique du rayon $r_1 - \rho$ par rapport à celle r_1, et réciproquement : mais la surface intérieure du cylindre creux est identique avec la surface convexe du cylindre plein que nous considérons ; donc le changement de volume total de celui-ci sera représenté par l'équation (5).

Supposons pour un instant que dans la pièce tordue, comme dans celle allongée ou comprimée, le changement de volume soit uniformément réparti sur toute la section : l'équation (6) s'énoncera simplement de la manière suivante : *La contraction par unité de volume est égale au produit des carrés du rayon du cylindre et de l'angle de torsion ;* donc le cylindre n'éprouverait aucun changement de longueur, et chaque section sans se déformer se contracterait dans le sens du rayon. Soit r_2 le rayon du cylindre tordu ; on aura

$$\pi r_2^2 l_1 - \pi r_1^2 l_1 = - \pi r_1^4 \alpha^2 l_1,$$

Digitized by Google

et puisque $r_1\,\alpha$ est toujours une très-petite quantité,

$$r_2 = r_1\left(1 - \frac{r_1^2\,\alpha^2}{2}\right). \tag{7}$$

Maintenant développons la surface du cylindre avant et pendant la torsion. Soient, *fig.* 6, $AB = l$ sa longueur et $AC = BD$ sa circonférence développée avant la torsion, le parallélogramme ACEF représentera à très-peu de chose près le développement de sa surface tordue, chaque génératrice du cylindre se transformant en une hélice dont les tangentes font avec la base l'angle constant γ que l'on appelle l'inclinaison de l'hélice ; soit δ le complément de cet angle : on aura, en négligeant les quantités d'un ordre supérieur au second,

$$\sin\gamma = \cos\delta = 1 - \frac{r_1^2\,\varphi^2}{2\,l^2} = 1 - \frac{r_1^2\,\alpha^2}{2},$$

et en substituant dans l'équation (7), on a

$$r_2 = r_1\cos\delta = r_1\sin\gamma. \tag{8}$$

Le rayon du cylindre tordu est égal au rayon primitif multiplié par le sinus des angles d'inclinaison des hélices à la surface.

Remarquons encore que nous pouvons même mettre

$$\sin\delta = r\,\alpha,$$

d'où

$$-\frac{\delta u}{u} = \cos^2\gamma.$$

Soit R_1 le rayon de courbure de ces hélices, on a

$$R_1 = \frac{r_1}{\cos^2\gamma}\ (*)$$

et

$$-\frac{\delta u}{u} = \frac{r_1}{R_1}. \tag{9}$$

(*) Ce théorème a été démontré d'une manière très-simple par M. Résal. (*Mémoires de la Société d'Emulation du Doubs.*)

Digitized by Google

La diminution du volume est au volume comme le rayon de la base est au rayon de courbure de l'hélice superficielle.

J'ai cru devoir faire ressortir ces conséquences remarquables de l'interprétation de la formule que nous avons admise pour un instant ; mais celle-ci est évidemment fondée sur une hypothèse inexacte : il est impossible que la contraction soit constante et indépendante du rayon vecteur de la molécule, et c'est là précisément ce qui fait la difficulté du problème. En effet, nous avons vu que la contraction dans chaque couche doit être indépendante du diamètre du cylindre dont elle fait partie, sans quoi, r étant le rayon extérieur d'un de nos cylindres creux, la diminution de volume du cylindre intérieur du rayon r_1 serait égale à $\pi r_1^2 r^2 \alpha^2$ et non à $\pi r_1^4 \alpha^2$. Il faut donc que la contraction proportionnelle υ satisfasse à l'équation suivante :

$$(10) \qquad \int_0^{2\pi} d\varpi \int_0^{l_1} dx \int_0^{r_1} \upsilon \rho \, d\rho = -\pi r_1^4 \alpha^2.$$

Si en outre nous appelons avec M. Lamé u, v et w les trois déplacements dans le système des coordonnées semi-polaires, il faut que l'on ait l'équation

$$\upsilon = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho u}{d\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{dv}{d\varpi} + \frac{dw}{dx}$$

dans laquelle l'axe des x est l'axe de torsion, ϖ l'angle que fait le rayon vecteur de l'élément avec un plan méridien fixe, et ρ ce rayon lui-même. Les déplacements u, v, w doivent en même temps satisfaire aux équations générales de l'équilibre et aux conditions d'équilibre de la surface en y mettant $\rho = r_1$ et $x = \pm \frac{l}{2}$.

J'ai fait beaucoup de tentatives pour résoudre ce problème sans y introduire de nouvelles hypothèses ; malheureusement tous mes efforts sont restés sans succès et je ne

Digitized by Google

crois pas devoir reproduire ici des calculs qui n'auraient d'autre mérite que de faire ressortir des difficultés suffisamment connues des géomètres et qui consistent : 1° en ce qu'il n'est plus permis ici de développer les forces et les déplacements en séries ascendantes suivant les puissances des dimensions transversales, et de négliger tous les termes affectés d'une de ces puissances supérieure à la première ; 2° en ce que le changement de volume élémentaire est une fonction de ρ et de z et que par suite les différentielles $\frac{dv}{d\rho}$ et $\frac{dv}{dz}$ qui sont comprises dans les équations générales de l'équilibre ne se réduisent pas à zéro, ainsi que cela a lieu dans le cas de l'allongement ou de la compression ; 3° en ce qu'il faudra pour établir l'équilibre, introduire à la place du moment de résistance d'un corps homogène celui d'un cylindre dans lequel la densité varie suivant une loi connue. On le voit, ces difficultés sont les mêmes que celles qui ont jusqu'ici rendu impossible la solution du problème plus général proposé par l'Académie ; peut-être qu'en introduisant dans le calcul les résultats de mes expériences les géomètres seront plus heureux que je ne l'ai été moi-même.

Pour le moment, nous ne tirerons de l'équation (10) que ce seul résultat qui nous sera utile dans une autre partie de ce Mémoire, à savoir : que dans un cylindre tordu la densité va en croissant du centre à la circonférence proportionnellement au carré de la distance.

Avant de quitter ce sujet je ferai remarquer que l'ancienne théorie des filets, sans fournir une solution complète du problème, permet du moins d'entrevoir des résultats qui s'accordent parfaitement avec les expériences de rupture dont nous parlerons plus loin. Nous avons vu que chaque fibre élémentaire subirait un allongement proportionnel de $\frac{\rho^2 \alpha^2}{2}$ si toutes les molécules qui se trouvaient primitivement dans un même plan perpendiculaire à l'axe de-

Digitized by Google

vaient s'y trouver encore après la torsion. Supposons maintenant un cylindre absolument libre et mobile à son extrémité tordue MN, *fig.* 7, plaçons l'origine des coordonnées à l'extrémité encastrée CD, et considérons une tranche infiniment mince AB placée à la distance x de l'origine et comprise entre deux plans perpendiculaires à l'axe ; soit m un élément de cette couche à la distance ρ de l'axe : cet élément éprouve une traction longitudinale qui tend à le rapprocher du point encastré et qui est sensiblement égal à $E\frac{\alpha^2}{2}x\rho^3\,d\rho\,d\varpi$; pour l'anneau entier du rayon ρ cette force est de $\pi E\alpha^2 x\rho^3\,d\rho$. Maintenant, si le corps n'était pas élastique dans le sens transversal aussi bien que dans le sens longitudinal, si tous les points d'une section transversale étaient reliés entre eux d'une manière invariable, cette section tout entière se déplacerait parallèlement à elle-même, la partie du cylindre comprise entre elle et le point d'encastrement se raccourcirait d'une longueur égale à $\pi\alpha^2 x\frac{r_1^4}{4}$, et tout le cylindre éprouverait une diminution de volume de $\pi\frac{r_1^4}{12}\alpha^2 l$. Au contraire, la lame infiniment mince étant élastique elle-même doit nécessairement se courber sous l'action de ces forces croissantes du centre à la circonférence, et c'est seulement après avoir pris sa nouvelle forme d'équilibre qu'elle se déplacera dans le sens de l'axe pour venir en *ab*.

Nous pouvons admettre que le déplacement de chaque anneau par rapport au centre de la section à laquelle il appartient, est proportionnel aux forces qui lui sont directement appliquées ; chaque lame infiniment mince prendra donc la forme d'un paraboloïde de révolution, et les paramètres de toutes les paraboles génératrices iront en augmentant depuis l'extrémité libre jusqu'au point d'encastrement où ce paramètre devient infiniment grand. Mais cette courbure des sections ne saurait avoir lieu sans une contraction

Digitized by Google

transversale, puisque chaque diamètre du cercle est ployé en un arc de parabole; donc dans le cylindre tordu l'épaisseur ne sera plus constante : elle décroîtra du point encastré jusqu'à l'extrémité libre, et elle sera en chaque point sensiblement égale à la double ordonnée qui, dans la parabole correspondante, limite un arc dont la longueur est égale au diamètre primitif du cylindre. Les paramètres étant réciproquement proportionnels aux abscisses x, le cylindre limité par une surface plane se convertit définitivement en un cône tronqué dont l'angle à la base diffère extrêmement peu d'un angle droit, et qui est terminé par une calotte paraboloïdique, c'est-à-dire que la diminution de volume est représentée par le volume du solide que l'on obtient en faisant faire à la surface MC *co* O une révolution entière autour de l'axe OP.

Dans nos expériences, les deux extrémités du cylindre sont encastrées, et la résistance de l'encastrement fixe étant nécessairement égale au moment du couple tordant, le cylindre se compose réellement de deux moitiés séparées par le plan médian CD, *fig.* 8, et dont chacune éprouve la torsion totale $\frac{\varphi}{2}$, tandis que le plan médian n'éprouve ni torsion, ni déplacement longitudinal. Pendant la torsion, le cylindre se sera transformé en deux cônes M*cod*N et M′*c*′ *o*′ *d*′ N′, séparés par le ménisque parabolique *codd*′ *o*′ *c*′ qui, dans chacune de ses couches, aura éprouvé un allongement égal à la somme des raccourcissements de la même couche dans les deux moitiés; il est probable qu'au lieu d'être tangentes les deux calottes sont dans l'axe même séparées par une certaine épaisseur *oo*′ du ménisque.

En considérant le cylindre tordu comme composé de deux cônes tronqués et accouplés, et désignant par r_2 le rayon de la petite base de ces cônes, on a

$$\pi r_1^2 - \frac{\pi}{3}(r_1^2 + r_2^2 + r_1 r_2) = -\pi r_1^4 \alpha^2,$$

Digitized by Google

d'où, en tenant compte de ce que $r_1 - r_2$ est une petite quantité, on tire la relation remarquable :

$$\frac{r_2}{r_1} = 1 - r_1^2 \alpha^2. \tag{11}$$

Cette théorie est directement indiquée par les surfaces de rupture, elle a en outre le mérite de faire comprendre les faits que nous avons déjà mentionnés [VIII (2) et (3)]; en effet, les angles de torsion doivent croître plus rapidement que les charges puisque l'angle du cône devient de plus en plus aigu; au contraire l'angle moyen de torsion diminue à mesure que la longueur augmente, parce que l'angle à la base du cône se rapproche de plus en plus d'un angle droit; enfin, lorsque le carré du rayon est négligeable par rapport à la longueur, toute influence du changement de volume disparaît pour des angles de torsion qui ne sont pas eux-mêmes infiniment grands.

XI. — Nous nous sommes occupé jusqu'ici de la recherche de quantités tellement petites, qu'elles ont pu être considérées comme négligeables, mais tellement importantes selon nous, qu'elles doivent servir de base à tous les perfectionnements ultérieurs dont la théorie est susceptible; nous allons maintenant appliquer à nos expériences le théorie généralement admise, en y introduisant seulement la valeur de la constante qui résulte de notre Mémoire déjà cité. On a pour les cylindres pleins la formule

$$\psi = \frac{16}{3} \cdot \frac{180}{\varpi^2} \cdot \frac{p R'}{E} \cdot \frac{l}{r^4}, \tag{12}$$

et pour les cylindres creux

$$\psi = \frac{16}{3} \cdot \frac{180}{\varpi^2} \cdot \frac{p R'}{E} \cdot \frac{l}{r^4 - r_1^4}, \tag{13}$$

où il faut mettre $p = 1$, $R' = 247{,}5$, $l = 1000$, pour trouver l'angle moyen que nous tirons de nos expériences.

Digitized by Google

Résumé des expériences sur la torsion des cylindres à base circulaire. (Tableau n° I.)

N^os.	SUBSTANCE	RAYON r.	COEFFIC. d'élasticité d'après l'allongement E.	ANGLE MOY. DE TORSION : ψ	
				Calculé.	Trouvé.
1	Fer.....	8,220	17805	0.17.46,1	0.17.52,1
2	Fer.....	5,501	"	1.28. 0,8	1.26.31,3
3	Acier fondu anglais.	5,055	19542	1.53.12,0	1.51.13,4
4	Cuivre jaune.....	5,031	9395	3.59.59,1	3.54. 6,0
5	Verre ordinaire....	3,535	6200	24.51 56,0	24.15.34,7
6	Verre ordinaire.....	3,4225	"	28.18. 2,0	28.30.14,0

Résumé des expériences sur la torsion des cylindres creux en cuivre jaune. (Tableau n°s II et V.)

NUMÉROS.	RAYON extérieur r.	RAYON intérieur r_1.	COEFFICIENT d'élasticité d'après l'allongement E.	ANGLE MOY. DE TORSION : ψ.	
				Calculé.	Trouvé.
53	11,525	10,021	10917	0.17.30,2	0.20. 0,6
54	7,082	4,955	10444	1.12.18,3	1.16.52,9
55	5,047	3,0315	10276	4. 9. 4,0	4. 6.54,7
7	5,602	2,4665	9665	2.37.40,4	2.33.38,2
8	4,5605	2,478	9855	6.11.10,3	6. 0.53,8
9	3,6955	2,471	10645	15. 9.14,4	15.42.37,3

On trouvera cet accord entre le calcul et l'expérience très-satisfaisant si l'on se rappelle combien la formule renferme d'éléments qui tous, et surtout la valeur de E, peuvent être entachés d'une certaine erreur. Les différences ne sont généralement pas de plus de $\frac{1}{50}$, et les angles observés sont plus petits que ceux trouvés par le calcul, à l'exception des cylindres 1, 53 et 54 où la différence a lieu en sens inverse et dépasse la limite des erreurs au moins pour les deux derniers. Or ces trois pièces sont précisément

Digitized by Google

celles dont les diamètres extérieurs sont les plus considérables, et quoique le défaut d'homogénéité (VI) du cylindre 53 ait pu contribuer à produire cette différence, nous pouvons en conclure cependant que pour des cylindres de ces diamètres la longueur moyenne de 1 mètre n'est pas assez grande pour que les déformations de leurs sections et les changements de volume soient négligeables par rapport aux erreurs d'observation ; cela n'a lieu avec cette longueur que lorsque le rayon ne dépasse pas 5 millimètres. Il est probable que la formule ne sera applicable à un cylindre de 10 millimètres de rayon qu'à partir d'une longueur de 2 mètres, et l'on comprend combien les différences peuvent devenir grandes avec des pièces de $1^m,5$ de longueur sur $0^m,1$ de diamètre, comme celles que l'on emploie dans la pratique et qui ont servi aux expériences de Mulhouse (*) ; pour n'en citer qu'un exemple, on peut supposer que la torsion d'un angle de 0,5 était entièrement temporaire, et que dans une substance aussi roide que la fonte la torsion permanente était encore tout à fait insensible, on avait donc $p = 100$, $R' = 2000$, $\psi = 0,5$, $l = 1500$, $r = 150$, d'où $E = 9338$, valeur apparemment trop petite déjà malgré la faiblesse de cette première torsion, et qui allait en diminuant à mesure que les angles de torsion augmentaient.

Quant à l'exactitude de la constante que j'ai introduite dans la formule, nul doute ne peut subsister à cet égard ; tous les angles calculés seraient avec l'ancienne formule de $\frac{1}{16}$ plus petits, et il en résulterait entre le calcul et l'expérience un désaccord constant et de beaucoup supérieur à la limite des erreurs, désaccord qui, dans les torsions considérables, atteindrait souvent l'importance de plusieurs degrés. Cette même remarque s'applique également à tous les résultats qui vont suivre, et je crois pouvoir me dispenser d'insister par la suite sur ce point ; mes formules se trouvent

(*) Morin, *Résistance des matériaux*, page 440.

Digitized by Google

confirmées quelle que soit la forme particulière de la section de la pièce.

Sur la torsion des cylindres elliptiques.

XII.—Je regrette de n'avoir pas réussi à faire tirer des tubes creux à cavité elliptique ; l'observation des changements de leur volume intérieur aurait offert une vérification importante des résultats trouvés pour les cylindres circulaires d'un côté et pour les prismes rectangulaires d'un autre côté ; mais j'ai été arrêté par des difficultés d'exécution : déjà même les cylindres elliptiques pleins ayant passé par des filières qui ne sont pas faites d'une seule pièce, mais formées de deux mâchoires réunies, ne présentent pas des contours d'une parfaite régularité.

On obtient la formule pour la torsion de ces cylindres, en substituant dans la formule que M. Cauchy a trouvée pour les prismes rectangulaires, à la place du moment d'inertie du rectangle par rapport à l'axe le moment polaire de l'ellipse (*) ; soient c_1 et c_2 les deux demi-axes. Ces deux moments sont $\mu' = \frac{\varpi}{4} c_1^3 c_2$ et $\mu'' = \frac{\varpi}{4} c_1 c_2^3$, et l'on trouve

$$(14) \qquad \psi = \frac{8}{3} \cdot \frac{180}{\varpi^2} \cdot \frac{p R'}{E} \cdot \frac{l(c_1^2 + c_2^2)}{c_1^3 c_2^3}.$$

Résumé des expériences sur la torsion des cylindres elliptiques.
(Tableau n° III.)

N°s.	SUBSTANCE.	DEMI-AXES		COEFFIC. d'élasticité d'après l'allongement E.	ANGLE MOYEN DE TORSION : ψ.	
		c_1.	c_2.		Calculé.	Trouvés
11	Acier fondu...	7,105	3,697	19085	2.13.56,7	2.10.55,4
12	Id.....	9,900	2,5075	"	4.18. 0,1	4.13.18,2
13	Cuivre jaune..	7,062	3,669	9634	4.32.56,7	4.30.41,2
14	Id.....	9,875	2,498	"	8.38.11,2	8.54.33,9

(*) Voyez les ouvrages de MM. Persy, Poncelet, Moseley et Weissbach.

Digitized by Google

Les résultats moyens des expériences s'accordent donc avec le calcul d'une manière satisfaisante même pour les cylindres 12 et 14 qui ont pour bases des ellipses d'une forte excentricité ; dans la théorie de M. de Saint-Venant, cet accord prouverait que le premier gauchissement qui seul existerait dans des cylindres elliptiques, et dont l'influence sur le moment de résistance à la torsion n'a pas été déterminée par ce géomètre, serait complétement négligeable sous ce rapport.

Les détails de nos expériences prouvent qu'il suffirait d'employer des longueurs moins considérables pour que cet accord cessât d'exister ; la longueur moyenne a été de 500 millimètres, et nous avons vu que pour un cylindre circulaire de 10 millimètres de rayon, cette longueur serait encore loin de donner des angles conformes à ceux qui résultent du calcul, tandis qu'elle est suffisante pour un cylindre elliptique dont l'un des demi-axes a cette même dimension de 10 millimètres ; d'où l'on peut conclure qu'il suffit que la longueur soit égale à environ 100 fois le petit axe.

Sur la torsion des prismes homogènes à base rectangulaire.

XIII. — La torsion des prismes rectangulaires constitue la partie de ces recherches la plus importante au point de vue théorique, et la moins bien vérifiée par les expérimentateurs. Des expériences de Duleau et de Savart on aurait pu conclure, il est vrai, que pour les prismes à base carrée l'angle de torsion réel est plus grand que celui qui résulte de la formule de M. Cauchy ; il en est de même pour les autres sections rectangulaires : mais les coefficients d'élasticité de ces prismes n'ayant pas été déterminés par la voie directe, on pouvait toujours attribuer les différences entre les résultats à des différences qui auraient existé entre les élasticités des substances employées. D'un autre côté, on a

Digitized by Google

cherché à faire disparaître ce désaccord en introduisant dans la formule des coefficients de correction, qui varieraient avec le rapport des côtés de la base entre eux, mais qui seraient indépendants des dimensions absolues de ces côtés. Actuellement nous pouvons nous servir des expériences de Duleau et de Savart pour vérifier cette supposition.

En effet, la formule applicable aux cylindres circulaires est assez bien établie maintenant pour que l'on puisse, des expériences faites sur ces cylindres, tirer le coefficient d'élasticité de chaque substance, et le substituer ensuite dans la formule des prismes, pourvu que dans chaque cas les substances du cylindre et du prisme aient été autant que possible identiques. Soient ψ_1 l'angle de torsion calculé et ψ_2 l'angle trouvé pour la torsion d'un prisme; nous désignerons par c le coefficient de correction, de sorte que l'on aura $\frac{\psi_1}{\psi_2} = c$, et E sera la moyenne des coefficients d'élasticité de tous les cylindres de même matière que ce prisme, qui ont été soumis à la torsion par le même auteur (*).

(*) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, tome XXV, page 212.

Digitized by Google

Expériences de Duleau.

$p = 10$; $R' = 320$ (degrés sexagésimaux).

SUBSTANCE.	LONGUEUR l.	DEMI-CÔTÉS a.	DEMI-CÔTÉS b.	COEFFIC. d'élasticité E.	ANGLE DE TORSION. Calculé.	ANGLE DE TORSION. Trouvé.	COEFFIC. de correction c.
	mm	mm	mm		°	°	
Fer du Périgord.	3390	16,3	16,3	17321	0,508	0,62	0,820
Id.	2520	10,2	10,2	"	2,464	3,08	0,800
Fer anglais.....	4120	10,0	10,0	19442 (1)	3,885	6,50	0,598
Id.....	2520	"	"	"	2,376	4,00	0,594
Fer du Périgord.	2910	17,0	5,25	17321	6,857	7,20	0,952
Fer anglais.....	2910	17,0	4,3	19442	10,802	11,40	0,947
Id.....	1550	"	"	"	5,753	5,62	1,024
Id.....	2910	33,9	7,35	"	0,532	0,85	0,626

Expériences de Savart.

$R' = 111$; Angle de torsion trouvé de 1 degré (division décimale).

SUBSTANCE.	LONGUEUR l.	DEMI-CÔTÉS a.	DEMI-CÔTÉS b.	COEFFIC. d'élasticité E.	POIDS p.	ANGLE de torsion calculé.	COEFFIC. de correction c.
Acier fondu.....	1200	2,86	2,86	19800 (2)	0,1320	0,845	0,845
Cuivre.....	649	4,59	4,59	11235	0,8800	0,809	0,809
Id.....	"	2,83	2,83	"	0,1275	0,811	0,811
Id.....	"	2,34	2,34	"	0,0595	0,810	0,810
Laiton.....	997	4,60	1,78	9774	0,0557	0,890	0,890
Acier fondu.....	219,4	25,935	0,585	19800	0,0380	0,739	0,739

(1) Duleau cite pour le fer anglais cylindrique deux expériences dont la première donne ce coefficient de 19442, tandis que la seconde conduirait à un coefficient de 22610; je n'ai pas cru devoir tenir compte de ce dernier résultat, évidemment exagéré.

(2) Pour un acier fondu de bonne qualité nous pouvons admettre ce chiffre, à défaut d'expériences sur des verges cylindriques du même acier.

Ces résultats prouvent que le coefficient de correction se rapproche de l'unité à mesure que l'un des côtés de la base

Digitized by Google

devient un multiple plus grand de l'autre, ou, en d'autres termes, que la correction diminue à mesure que les pièces deviennent plus plates; mais ils font voir en même temps que les corrections sont loin d'être constantes pour des bases semblables. Dans les prismes carrés, le coefficient varie de 0,594 à 0,845, il est de 0,890 à 0,952 lorsque les côtés de la base sont dans le rapport de 2 ou 4 à 1, et qu'en même temps le plus grand des deux côtés ne dépasse pas les dimensions absolues que l'on avait données aux côtés des verges carrées; enfin, dans la dernière expérience de Duleau le rapport des côtés est égal à 5, et dans la dernière de Savart il est même de 50, et l'on aurait pu supposer que les coefficients de correction seraient très-voisins de l'unité, tandis qu'ils sont de 0,626 et de 0,739, ce qui ne peut s'expliquer qu'en tenant compte de ce que dans ces deux expériences la longueur absolue de l'un des côtés était très-considérable par rapport à la longueur de la pièce.

XIV. — Comme pour les cylindres, nous avons commencé par rechercher les lois du changement de volume; l'influence de la longueur étant maintenant bien connue, j'ai fait tirer 3 prismes creux de même longueur, dans lesquels les sections transversales des cavités intérieures sont équivalentes, tandis que les côtés de ces sections varient considérablement de l'une à l'autre. La loi de proportionnalité entre le changement de volume et le carré de l'angle de torsion s'est de nouveau confirmée, et quant à la diminution absolue de la cavité extérieure, ramenée à une torsion de 1 degré, j'ai obtenu les résultats suivants :

Digitized by Google

Résumé des expériences sur la diminution de volume, produite par la torsion des prismes rectangulaires creux. (Tableau n° VI.)

N°s.	ÉPAISSEUR de la paroi. $e.$	LONGUEUR $l_1.$	DEMI-CÔTÉS INTÉRIEURS $a_1.$	$b_1.$	ANGLE MOYEN de torsion. $\frac{\psi_1}{p}.$	DIMINUT. MOY. DU VOL. $-\delta u.$ Calculée.	Trouvée.	Trouvée pour $\frac{\psi_1}{p}=1,\ l=1000.$
56	1,9745	1000,28	5,0745	5,0305	1°. 1'.25",4	0,00537	0,00561	0,005155
57	1,8260	979,50	6,3990	3,9690	1.12. 10,4	0,01158	0,01695	0,011484
58	2,0185	1019,00	10,0065	2,4815	1. 6.49,4	0,12052	0,12045	0,098956

Les nombres de la septième colonne sont calculés d'après la formule suivante :

$$(15)\quad \delta u = -\frac{(a_1^2+b_1^2)^4}{4(a_1 b_1)^2}\, a_1 b_1 l_1 \alpha^2 = \frac{\pi^2}{180^2}\,\frac{(a_1^2+b_1^2)^4}{16 a_1 b_1}\,\frac{\psi_1^2}{l_1},$$

d'après laquelle le changement de volume est proportionnel à la quatrième puissance du carré de la demi-diagonale divisée par le carré de l'aire de la section. Cette formule empruntée aux expériences n'a pour le moment d'autre valeur que de faire voir que le changement de volume des prismes comme celui des cylindres dépend de la distance à l'axe de torsion du point de la section transversale qui en est le plus éloigné ; mais il n'est pas impossible que la théorie après de nouveaux progrès conduise à une formule différente de celle-ci, et qui ne s'accorde pas moins bien avec les expériences.

La dernière colonne fait voir l'accroissement rapide de la diminution du volume pour des prismes de plus en plus plats, tout étant égal d'ailleurs ; cette diminution, pour un prisme dont les côtés de la base sont dans le rapport de 4 à 1, est de près de 20 fois plus grand que pour un prisme à base carrée et équivalente.

D'après la théorie que nous avons essayé d'établir pour

Digitized by Google

les cylindres, le prisme tordu se compose de deux pyramides à surfaces courbes, accouplées par leurs petites bases, tandis que les grandes bases conservent leur forme et leur section primitives ; d'après l'équation (1) toutes les autres sections se rétrécissent, leurs côtés cessent d'être des droites, et elles prennent la forme indiquée par *abcd*, *fig.* 9 ; cette flexion des côtés explique certains phénomènes que l'on observe au moment de la rupture.

XV. — Dans le tableau suivant, les prismes à base rectangulaire que j'ai soumis à la torsion se trouvent rangés d'après le rapport des côtés de leurs bases depuis ceux dont la base est sensiblement carrée jusqu'aux plus plats, que l'on considère ordinairement comme des lames ou ressorts ; les angles de torsion sont calculés d'après la formule de M. Cauchy, qui devient maintenant

$$(16)\qquad \left\{\begin{aligned} \psi &= \frac{180}{\pi}\cdot\frac{1}{2}\cdot\frac{p\mathrm{R}'}{\mathrm{E}}\cdot\frac{l(a^2+b^2)}{a^3b^3} \\ &= \frac{180\times 247{,}5\times 1000}{2\pi}\cdot\frac{a^2+b^2}{\mathrm{E}a^3b^3}, \end{aligned}\right.$$

et le coefficient de correction est trouvé comme ci-dessus.

Digitized by Google

Résumé des expériences sur la torsion des prismes à bases rectangulaires. (Tableau n° IV.)

N°s.	RAPPORTS DES CÔTÉS $\frac{a}{b}$ approximatif.	RAPPORTS DES CÔTÉS $\frac{a}{b}$ exact.	DEMI-CÔTÉS a.	DEMI-CÔTÉS b.	LONGUEUR moyenne l.	$\frac{l}{b}$	SUBSTANCE.	COEFFICIENT d'élasticité d'après l'allongement : E.	ANGLE DE TORSION calculé.	ANGLE DE TORSION trouvé.	COEFFICIENT de correction c.
39		1,0830	11,4255	10,550	243,00	23	Flint.....	4976	0.11.55,6	0.18.17,5	0,6520
40		1,1036	9,900	8,975	80,50	9	Id.....	"	0.21.53,4	0.32.29,9	0,6736
15		1,0000	12,4125 (1)	12,4125	1000,00	81	Fer.....	20388	0. 1.45,5	0. 2. 8,7	0,8196
16		"	9,877	9,877	500,00	51	Id.....	"	0. 4.23,1	0. 5.16,1	0,8323
17		1,0063	7,5325	7,485	1000,00	134	Id.....	"	0.13. 7,7	0.15.54,2	0,8255
41		1,0062	7,182	7,138	544,50	76	Cristal.....	5238	1. 1.48,5	1.14. 9,4	0,8335
42		1,0005	6,8015	6,798	592,80	87	Id.....	"	1.15.58,9	1.24.19,2	0,9011
43		1,0300	6,9095	6,708	708,25	105	Id.....	"	1.15.38,9	1.23.47,9	0,9027
27	1	1,0054	5,3385	5,310	750,00	141	Fer doux.....	18706	0.56.36,5	1. 2.38,5	0,9037
44		1,0670	6,309	5,913	675,90	114	Verre à base de soude.	6040	1.41.26,2	1.50.56,8	0,9143
45		1,0192	5,988	5,875	534,50	91	Id.....	6280	1.49.29,6	1.56.10,2	0,9426
46		1,0651	5,121	4,808	500,00	104	Id.....	6722	3.29.12,6	3.47.54,6	0,9179
47		1,0234	4,820	4,710	505,00	107	Verre fin à base de potasse.....	6040	4.33.24,1	4.59. 4,0	0,9142
31		1,0007	3,0025	3,0005	500,00	166	Acier fondu.....	19085	9. 9.17,7	10.11.39,3	0,8971
28		1,0014	2,502	2,4985	385,15	154	Fer doux.....	18800	19.18. 7,9	20.53. 8,3	0,9242
37		1,0174	1,814	1,783	250,00	140	Cuivre jaune.....	9634	140.43.22,8	151.28.12,3	0,9291
18	1 1/2	1,5152	11,990	7,913	1000,00	126	Fer.....	20388	0. 5. 2,5	0. 6.10,3	0,8169

(1) Ces dimensions dépassent la course de mon sphéromètre ; j'ai calculé la longueur du côté d'après l'aire de la section, considérée comme exactement carrée.

Digitized by Google

[Suite.] **Résumé des expériences sur la torsion des prismes à bases rectangulaires. (Tableau nº IV.)**

Nos.	RAPPORTS DES CÔTÉS $\frac{a}{b}$ approximatif.	$\frac{a}{b}$ exact.	DEMI-CÔTÉS a.	b.	LONGUEUR moyenne.	$\frac{l}{b}$	SUBSTANCE.	COEFFICIENT d'élasticité d'après l'allongement : E.	ANGLE DE TORSION calculé.	trouvé.	COEFFICIENT de correction c.
19		1,9918	11,915	5,982	"	167	Fer	"	0.10.14,6	0.12. 5,3	0,8474
32	2	2,2418	4,515	2,014	500,00	248	Acier fondu	19085	12. 4.36,5	12.33.27,7	0,9617
20	3	3,0256	12,060	3,986	1000,00	251	Fer	20388	0.30.18,2	0.33.22,0	0,9082
38		3,6016	7,459	2,071	500,00	241	Cuivre jaune	9336	12.20.48,1	13.17.45,0	0,9286
30	3 1/2	3,5893	6,100	1,6995	"	294	Tôle	17025	14.59.16,8	16.17.55,3	0,9195
48		3,9233	15,850	4 040	1000,00	247	Verre à glaces	6400	1. 7.32,2	1.11.14,0	0,9509
49	4	3,9783	15,750	3,989	951,50	238	Id.	"	1.10.45,4	1.13.10,0	0,9670
21		4,0040	11,940	2,982	1000,00	335	Fer	20388	1.10. 0,9	1.16.37,3	0,9138
33		3,9677	6,017	1,5165	500,00	330	Acier fondu	19085	18.49.44,0	19.46.42,4	0,9520
36	4 1/2	4,5248	13,640	3,0145	731,77	243	Acier Huntsman	19200	1. 2.11,8	1. 5.11,1	0,9542
29		4,6867	7,480	1,596	765,40	480	Fer	17825	13.40.53,0	14.33.36,9	0,9396
22	5	4,9153	11,900	2,421	1000,00	413	Id.	20388	2. 8.41,0	2.20.36,0	0,9153
23	6	6,0722	11,950	1,968	750,00	361	Id.	"	3.55.18,1	4.10.43,3	0,9390
50	8	7,7312	13,800	1,785	185,00	104	Verre à vitres	6900	13.18.41,8	14.32.28,6	0,9154
24		8,2828	11,960	1,450	375,00	260	Fer	20388	9.40.41,5	10.58. 0,1	0,8825
34	8 1/2	8,5552	9,0015	1,052	511,50	486	Acier fondu	19085	35.56. 4,2	36.22.36,3	0,9878
51	10	9,7452	15,300	1,570	435,50	278	Verre à vitres	6900	17.32.16,4	18.45.29,3	0,9349
52		10,2495	15,200	1,483	243,80	164	Id.	"	20.55.36,0	21.57.34,1	0,9529
25	12	11,7806	11,975	1,0415	375,00	360	Fer	20388	27.50.56,4	29.55.47,8	0,9304
26	23	23,0502	11,940	0,518	187,50	362	Id.	"	209.56.49,9	214.44.31,6	0,9776
35	33 1/2	33,4517	17,997	0,538	340,07	633	Acier fondu	19085	132.40.59,2	101.14. 2,1	1,3106

Digitized by Google

Ce tableau n'a pas besoin d'être expliqué : on remarquera seulement que la longueur inscrite dans la sixième colonne est la moyenne des longueurs employées (*), tandis que les angles de torsion sont tous calculés pour la longueur fixe de 1 mètre, en admettant, ce qui n'est pas, la proportionnalité entre les longueurs et les angles de torsion comme une loi rigoureusement vraie. Nous ferons abstraction du résultat tout à fait anormal que nous venons de trouver pour la dernière lame en acier (35); le calcul donne dans ce cas un angle de beaucoup supérieur à celui que nous avons trouvé par des séries d'expériences plusieurs fois répétées, et ce désaccord ne pourrait être expliqué actuellement qu'en admettant hypothétiquement un défaut d'homogénéité dans la matière. A part cette anomalie, le tableau fait ressortir les faits suivants :

1°. A égales longueur et largeur, la correction diminue avec l'épaisseur ; cette loi résulte avec évidence des expériences faites sur les prismes provenant du même fer, et ayant tous en chiffres ronds une largeur de 24 millimètres sur une longueur de 1 mètre :

Épaisseur.						
24^{mm}	16^{mm}	12^{mm}	8^{mm}	6^{mm}	$4^{mm},8$	4^{mm}
Coefficient de correction.						
0,8196	0,8169	0,8474	0,9082	0,9138	0,9153	0,9890

2°. La longueur et l'aire de la section restant constantes, la correction diminue à mesure que l'une des dimensions transversales devient un plus grand multiple de l'autre ; pour le prouver, rappelons seulement nos résultats sur les prismes en acier fondu, dont la longueur moyenne est de

(*) Dans les cas où l'on avait opéré avec des longueurs de 1000, 500 et 250 millimètres, nous avons admis comme longueur moyenne 500 au lieu de 583, parce que l'angle moyen ψ s'accorde généralement bien avec la moyenne $\frac{\psi_1}{p}$ trouvée pour cette longueur.

Digitized by Google

500 et la section de 36 millimètres carrés :

Valeur de $\frac{a}{b}$	1	2	4	8
Coefficient de correction.	0,8971	0,9617	0,9520	0,9878

3°. La section restant la même, la correction diminue à mesure que la longueur augmente ; cette proposition est une conséquence de la non-proportionnalité que nous avons signalée (VIII, 3), et elle est confirmée par plusieurs faits, tels par exemple que la grandeur des corrections applicables aux deux prismes en flint.

4°. A égale longueur et pour des sections semblables la correction diminue avec la longueur absolue des côtés de la section. Le tableau tout entier est disposé pour faire ressortir cette relation importante que l'on aperçoit facilement pour les prismes carrés ou peu aplatis, mais qui n'est peut-être pas suffisamment mise en évidence par mes expériences sur des prismes très-plats, les dimensions de mon appareil n'ayant pas permis de faire varier ceux-ci entre des limites suffisamment éloignées. Cependant je n'hésite pas à énoncer cette proposition d'une manière générale, et il ne me semble nullement douteux que, par exemple, pour le rapport $\frac{a}{b} = 10$, j'aurais trouvé un coefficient bien plus petit que 0,94, si à la place d'un prisme dont la base était de 30 millimètres sur 3, j'avais pu en employer un de 100 sur 10.

5°. La correction diminue avec l'intensité du couple ; c'est une conséquence de l'accroissement graduel qu'éprouve l'angle moyen à mesure qu'augmentent les charges qui constituent les couples (VIII, 2). En effet, les coefficients de correction prennent des valeurs beaucoup plus voisines de l'unité, lorsque, au lieu de diviser l'angle calculé par l'angle moyen qui résulte de l'ensemble des expé-

Digitized by Google

riences, on le divise par le premier angle proportionnel qui est le plus faible de tous; citons-en quelques exemples :

NUMÉROS.	LONGUEUR.	POUR $l = 1000$ ANGLE.		c.
		Calculé.	Trouvé.	
		° ′ ″	° ′ ″	
19	1000,0	0.10.14,6	0.11.48	0,869
23	"	3.55.18,1	3.47.20	1,035
24	500,0	9.40.41,5	9.49.20	0,985
25	"	27.50.56,4	28.10.20	0,989
27	1000,0	0.56.36,5	0.59.10	0,957
28	520,3	19.18. 7,9	20.27. 0	0,944
29	1030,8	13.40.53,0	14.17.55	0,957
32	1000,0	12. 4.36,5	12. 8.40	0,994
36	945,6	1. 2.11,8	1. 4.25	0,965
38	1021,2	12.20.48,1	11.33.38	1,076

Ces différences sont beaucoup plus faibles que celles que nous avons observées en nous servant des angles moyens. Pour deux de ces prismes (23 et 38) le premier angle observé est plus petit même que l'angle calculé, et nous ne saurions décider actuellement si ces différences en sens inverse des différences habituelles doivent être attribuées à des erreurs d'observation, ou bien si elles proviennent de ce que le coefficient d'élasticité a été calculé d'après des allongements plus considérables que ceux qu'éprouvent les fibres pendant ces premières torsions.

En résumé, la théorie fournit des résultats parfaitement exacts, qui n'exigent aucune correction pourvu que l'on ne cherche pas à appliquer les formules en dehors des conditions que l'on a admises pour pouvoir les établir, et qui sont : une longueur de prisme infiniment grande par rapport aux côtés de la base et des angles de torsion infiniment petits. Mais ces conditions ne sont jamais réalisées ni dans les expériences, ni dans la pratique; cette théorie n'assigne donc qu'une limite dont les résultats des expériences peuvent ap-

Digitized by Google

procher sans jamais l'atteindre, et dont on est fort éloigné toutes les fois que l'on donne aux prismes les dimensions transversales considérables et les longueurs relativement petites que l'on emploie habituellement, et toutes les fois qu'on leur fait subir des torsions notables. Dans ces cas, on ne peut pas se dispenser, dans l'état actuel de la théorie, d'employer des coefficients de correction empruntés aux expériences ; à cet effet, on pourrait ou bien chercher à établir une formule d'interpolation, ou dresser une Table à triple entrée dont les arguments seraient $\frac{a}{b}$, $\frac{l}{b}$ et le moment $p\,\mathrm{R}'$. Nos expériences ne pourraient fournir qu'une partie des éléments nécessaires pour la construction de cette Table; elles auraient besoin d'être complétées par des expériences faites sur une grande échelle et dans les conditions de la pratique ; on peut espérer du reste qu'une théorie plus générale que celle que nous possédons, et affranchie de toutes ces restrictions, fera disparaître de nos formules tous ces coefficients de correction purement empiriques.

XVI. — Nos expériences sur la torsion des prismes creux fournissent un nouveau moyen de contrôler les résultats que nous venons d'obtenir : le moment de la force doit être égal au moment de la résistance du prisme entier considéré comme plein, moins le moment de la résistance du prisme intérieur qui en a été retranché. Soient donc a et b les demi-côtés extérieurs du prisme, a_1 et b_1 les demi-côtés du prisme intérieur, et c, c_1 les coefficients de correction applicables à ces deux prismes ; on aura l'équation

$$(17) \qquad \psi = \frac{180.l.p\,\mathrm{R}'}{2\pi\,\mathrm{E}\left(c\,\frac{a^3\,b^3}{a^2+b^2} - c_1\,\frac{a_1^3\,b_1^3}{a_1^2+b_1^2}\right)}.$$

On aurait $c = c_1 = 1$ si la correction était négligeable; ou bien s'il était vrai que la correction fût indépendante de

Digitized by Google

la grandeur absolue des dimensions transversales, on aurait $c = c_1$ toutes les fois que le contour intérieur est semblable au contour extérieur; nos expériences prouvent le contraire. Prenons pour exemple le prisme à base carrée dont la cavité intérieure a également une section carrée. En mettant

$$c = c_1 = 1,$$

on trouve

$$\psi = 0.45.59,5 \text{ au lieu de } 1.1.15,1;$$

$$c = c_1 = 0,841$$

donne

$$\psi = 0.54.41,3,$$

valeur plus rapprochée de l'angle observé, mais qui en diffère encore de plus de $\frac{1}{10}$, et il en est de même pour les autres prismes creux. Au contraire, les coefficients de correction empruntés à notre Table et variant avec les dimensions absolues donnent les résultats généralement satisfaisants, que nous inscrivons ci-dessous.

Digitized by Google

Résumé des expériences sur la torsion des prismes creux à bases rectangulaires. (Tableau nº VI.)

Nos.	DEMI-CÔTÉS EXTÉRIEURS		$\frac{a}{b}$.	DEMI-CÔTÉS INTÉRIEURS		$\frac{a_1}{b_1}$.	COEFFICIENT d'élasticité d'après l'allongement E.	ANGLE calculé sans correction. ψ.	COEFFICIENT de correction. $\frac{\psi}{\psi_2}$.	COEFFICIENTS de correction d'après la Table		ANGLE DE TORSION	
	a.	b.		a_1.	b_1.					c.	c_1.	calculé. ψ_1.	trouvé. ψ_2.
56	7,049	7,010	1,005	5,0745	5,0355	1,008	10342	0.45.59,5	0,7509	0,825	0,918	0.58. 8,5	1. 1.15,1
57	8,225	5,795	1,419	6,399	3,969	1,612	10561	0.51.35,9	0,7003	0,820	0,930	1. 6.12,2	1.13.41,0
58	12,025	4,500	2,672	10,0065	2,4815	4,056	9825	0 52.95,4	0,8081	0,870	0,945	1. 1.50,7	1. 5.34,5

Digitized by Google

Les différences que l'on remarque encore entre les résultats calculés et trouvés proviennent probablement en grande partie de ce que ces prismes creux ont été soumis à des torsions absolues plus considérables que celles d'après lesquelles les coefficients de correction ont été calculés.

Sur la torsion des corps non homogènes.

XVII. — Nous ne nous occuperons ici que de corps doués de trois axes d'élasticité perpendiculaires entre eux, et notamment de la tôle et du bois; nous avons déjà fait ressortir (VI) les graves difficultés que l'on rencontre lorsque l'on veut appliquer la théorie à la détermination de l'augmentation de volume que ces corps éprouvent lorsqu'on les allonge. Ces difficultés se reproduisent lorsque l'on veut trouver leur moment de résistance à la torsion, en suivant exactement l'analyse de M. Cauchy, et en admettant que la torsion puisse être ramenée à de simples rotations. En partant des équations (1) et (2) et en désignant toujours par φ l'angle exprimé en longueur d'arc, on obtient à la place des équations (39) de M. Cauchy (*), les suivantes:

$$(18)\qquad \begin{cases} E_{1,0} = (Q+I)\,\xi_{1,1} + (Q+G)\,\dfrac{d\varphi}{dx}, \\ F_{0,1} = (R+G)\,\xi_{1,1} - (R+H)\,\dfrac{d\varphi}{dx}. \end{cases}$$

Ces forces tangentielles sont seules en jeu, mais on voit que chacune d'elles ne dépend plus seulement de l'axe d'élasticité qui coïncide avec sa direction, ainsi que cela avait lieu lorsque l'on négligeait les quantités G, H et I, mais que chaque force tangentielle est en même temps fonction des élasticités dont les axes sont perpendiculaires à sa propre direction; la théorie ne pourra donc être appliquée à ces corps que lorsque l'on connaîtra les rapports qui existent

(*) *Exercices de Mathématiques*, 4e année, page 54.

Digitized by Google

entre ces trois quantités et les trois coefficients d'élasticité E, E_1 et E_2.

La valeur de deux de ces coefficients nous est inconnue pour la tôle ; les résultats que nous avons obtenus sur la torsion de ces cylindres ne peuvent donc servir qu'à confirmer la conclusion que nous avons tirée de leur allongement, à savoir que leur substance ne peut pas être considérée comme homogène. En effet, le changement de volume qui accompagne la torsion et qui est comme pour les corps homogènes proportionnel au carré de l'angle de torsion, et réciproquement proportionnel à la longueur, ne conserve plus même son signe : la diminution de la capacité intérieure des cylindres est remplacée par une augmentation de ce même volume ; les angles de torsion que l'on trouve en considérant la tôle comme homogène et douée en tous sens d'une élasticité égale à son élasticité longitudinale, ces angles diffèrent assez notablement des angles observés, et les différences ont lieu en sens inverse de celles que nous avons remarquées pour les plus gros tubes en laiton ; en un mot tout indique que ces expériences pourront servir à la détermination des trois coefficients d'élasticité de la tôle étirée en cylindre, dès que la difficulté théorique que nous venons de signaler aura été levée.

Résumé des expériences sur l'augmentation de volume produite par la torsion des cylindres circulaires en tôle. (Tableau n° VII.)

N°s.	ÉPAISSEUR de la paroi. e.	LONGUEUR. l.	RAYON intérieur. r_1.	ANGLE de torsion moyen. $\frac{\psi_1}{p}$.	AUGMENTATION DE VOLUME δu. Calculée.	δu. Trouvée.	Pour $\psi = 1$, $l = 1000$
59	1,525	958,0	7,5005	0.20. 2,8	−0,0003529	0,001084	0,009303
60	1,037	537,0	5,727	0.37. 8,2	−0,0007361	0,001351	0,001894
61	0,723	1003,0	3,967	5.39.45,1	−0,0075766	0,011594	0,000363

Digitized by Google

La dernière colonne fait voir que les augmentations ne sont pas exactement dans le rapport des quatrièmes puissances des rayons; la sixième colonne contient, calculées d'après la formule (5), la diminution de volume qu'auraient éprouvées les capacités intérieures de ces cylindres si leurs parois avaient la même élasticité dans tous les sens. L'augmentation de volume qui a lieu réellement, est pour ces trois tubes plus grande que la diminution qui existerait dans ce dernier cas; mais la variabilité du rapport entre ces deux quantités prouve suffisamment que les valeurs des trois coefficients d'élasticité, différentes entre elles, varient en même temps d'un tube à l'autre.

N'ayant aucun moyen pour déterminer ces valeurs, nous allons calculer les angles de torsion d'après l'équation (13), en considérant la substance comme homogène et en mettant pour E la valeur de l'axe d'élasticité qui est parallèle à l'axe de torsion.

Résumé des expériences sur la torsion des cylindres creux en tôle.
(Tableau nos II et VII.)

NUMÉROS.	RAYON extérieur. r.	RAYON intérieur. r_1.	COEFFICIENT d'élasticité d'après l'allongement E.	ANGLE DE TORSION MOYEN ψ.	
				Calculé.	Trouvé.
59	9,025	7,5005	17490	0°,23′.48″,3	0°.20′.55″,6
60	6,764	5,727	18777	1.15.23,0	1. 9. 9,3
10	6,7675	5,8325	"	1.21.48,6	1.24.15,2
61	4,690	3,967	"	5.25.43,3	5.38.44,1

Je ne puis que signaler ces résultats sans en tirer de nouvelles conséquences.

La torsion des prismes en bois est plus instructive, parce que l'on peut déterminer d'avance les valeurs de leurs trois coefficients d'élasticité; les prismes dont je

Digitized by Google

me suis servi étaient travaillés avec beaucoup de soin, et taillés de façon à avoir des arêtes parallèles aux trois axes d'élasticité de l'arbre, qui sont placés le premier dans le sens des fibres, le second dans le sens du rayon, et le troisième suivant la tangente aux couches annuelles (*). Désignons ces trois coefficients par les lettres E, E_1 et E_2, et soient a et b les demi-côtés de la base respectivement parallèles aux axes E_1 et E_2; les équations (18) jointes à la suivante :

$$\frac{E_{1,0}}{b^2} = -\frac{F_{0,1}}{a^2} = \frac{\dfrac{E_{1,0}}{Q+I} - \dfrac{F_{0,1}}{R+G}}{\dfrac{b^2}{Q+I} + \dfrac{a^2}{R+G}} \text{ donnent :}$$

$$a^2 E_{1,0} - b^2 F_{0,1} = \frac{2\,a^2 b^2 \left(\dfrac{Q+G}{Q+I} + \dfrac{R+H}{R+G}\right)\dfrac{d\varphi}{dx}}{\dfrac{a^2}{R+G} + \dfrac{b^2}{Q+I}}.$$

Mais puisque le moment par rapport à l'axe est égal à $\frac{4}{3}ab\,(a^2 E_{1,0} - b^2 F_{0,1})$, et que l'on doit avoir $\varphi = 0$ pour $x = 0$, on trouve pour $x = l$ l'équation

$$(19) \qquad \varphi = \frac{\dfrac{3}{8}\left(\dfrac{a^2}{R+G} + \dfrac{b^2}{Q+I}\right) p R' l}{a^2 b^2 \left(\dfrac{Q+G}{Q+I} + \dfrac{R+H}{R+G}\right)}.$$

Dans l'impossibilité où nous sommes d'appliquer cette formule exacte, nous ferons les deux suppositions les plus habituelles afin d'obtenir des résultats que l'on puisse comparer avec l'expérience.

La première consiste à considérer le prisme comme homogène et comme ayant en tous sens une élasticité égale à celle que l'on trouve parallèlement aux fibres; dans ce cas, on a

$$Q + G = Q + I = R + G = R + H = \frac{K}{2} = \frac{3}{8}E,$$

(*) Chevandier et Wertheim, *Mémoire sur les propriétés mécaniques du bois.*

Digitized by Google

et l'équation (19) revient à celle (16) ; nous ne ferons ce calcul que pour faire voir combien sont grandes les erreurs que l'on commet en opérant de cette manière.

Dans la seconde hypothèse, également inadmissible, on néglige G, H et I, et l'on met

$$Q + G = Q + I = \frac{3}{8} E_1 ; \quad R + G = R + H = \frac{3}{8} E_2,$$

d'où

$$(20) \qquad \varphi = \frac{p R' l}{2 a^3 b^3} \left(\frac{a^2}{E_1} + \frac{b^2}{E_2} \right),$$

laquelle équation coïncide également avec l'équation (16) lorsque l'on y met $E = E_1 = E_2$.

Résumé des expériences sur la torsion des prismes en bois. (Tableau N° VIII.)

N°.	ESPÈCE de bois.	DEMI-CÔTÉS de la base		COEFFICIENTS d'élasticité			ANGLE DE TORSION CALCULÉ		ANGLE de torsion trouvé
		a.	b.	E.	E_1.	E_2.	d'après la formule (16).	d'après la formule (20).	ψ.
62	Chêne ...	10,125	10,100	1214	257	137	° ′ ″ 1. 7. 1,2	° ′ ″ 7.35.22,9	° ′ ″ 6.11.20,5
63	Sapin....	4,965	4,903	1478	162	54	18.55.30,0	293.32.32,3	122.56.38,5
64	Chêne ...	12,325	2,882	1214	257	137	17. 8.25,4	103. 3.28,8	114.57.18,7
65	Sapin....	12,225	2,890	1478	162	54	16.55.13,4	171.12.43,2	199.16. 9,5

Les chiffres de la huitième colonne comparés avec ceux de la dernière font voir que le calcul fait d'après la première hypothèse donne un angle qui n'est guère que $\frac{1}{9}$ à $\frac{1}{10}$ de l'angle effectif de torsion ; il en résulte que dans la pratique il faudra réduire dans le même rapport l'angle limite, si l'on veut continuer à n'introduire dans les formules que le coefficient d'élasticité longitudinal. Ainsi donc si le maximum de la torsion à laquelle on peut soumettre un prisme de bois sans danger de rupture est de 0°,6 à 1 degré, il faudra que la formule (16) ne donne pour ce même moment de la force qu'un angle de 0,1 degré.

Digitized by Google

La formule (20) donne des résultats beaucoup plus rapprochés ; on voit cependant que les angles calculés sont trop grands pour les pièces carrées et trop petits pour les pièces plates, dont les côtés sont dans le rapport environ de 4 à 1.

Ce désaccord ne pourra disparaître que lorsque l'on sera à même d'appliquer aux expériences la formule exacte (19).

Sur les vibrations tournantes des corps homogènes.

XVIII. — Les équations qui s'appliquent à l'état d'équilibre étant connues, on en déduit facilement celles qui ont lieu pour le mouvement ; dès lors les lois des vibrations tournantes sont basées sur les conditions fondamentales que nous avons déjà mentionnées plusieurs fois, et qui ne sont jamais réalisées dans les expériences que d'une manière plus ou moins imparfaite. Cependant la principale de ces conditions, celle qui limite les angles de torsion à des grandeurs infiniment petites, se trouve remplie dans ce cas par suite des très-petites amplitudes que l'on peut donner aux vibrations tournantes. Il en résulte cette conséquence importante, que les nombres des vibrations tournantes s'accorderont avec leurs valeurs théoriques, d'autant mieux que le son tangentiel (*) sera plus faible ; car, tout étant égal du reste, le coefficient de correction c devient une fraction d'autant plus petite que les torsions absolues deviennent plus grandes, et la racine carrée de ce coefficient de correction étant comprise comme facteur dans l'expression théorique du nombre de vibrations tournantes, il en résulte qu'à des amplitudes de plus en plus grandes correspondent des facteurs de plus en plus petits ; par suite, le son doit baisser à mesure qu'on le rend plus intense, et ré-

(*) Nous appellerons *son tangentiel* un son qui provient de vibrations tournantes, de même que l'on appelle *longitudinal* et *transversal* les sons qui résultent de vibrations du même nom.

Digitized by Google

ciproquement il doit monter en s'éteignant : c'est effectivement ce que l'on observe avec un peu d'attention. Rigoureusement parlant, un nombre de vibrations donné ne correspond jamais qu'à une certaine intensité du son tangentiel, et si nous avions un moyen pour déterminer cette intensité, nous pourrions trouver une relation entre l'amplitude des vibrations et la valeur du coefficient de correction.

Je profiterai de cette occasion pour faire remarquer que cette dépendance mutuelle entre l'intensité du son et son élévation n'a pas seulement lieu pour les vibrations tournantes ; c'est au contraire un fait général dont on a pu faire abstraction pour faciliter les calculs, mais dont il faudra tenir compte actuellement. Les sons des corps solides montent en s'éteignant, tandis que ceux des liquides et des gaz baissent à mesure qu'ils s'affaiblissent (*). En ce qui concerne les corps solides, ces inégalités proviennent évidemment de ce que l'allongement qu'ils éprouvent par l'effet d'une faible traction n'est ni rigoureusement égal à la compression produite par cette même force lorsqu'elle agit comme pression, ni rigoureusement proportionnel à cette force (**). Maintenant, lorsque l'on se sert de vibrations longitudinales pour déterminer le coefficient d'élasticité, on trouve nécessairement une valeur plus ou moins élevée selon que l'on considère comme le vrai son fondamental de la barre ou du fil un son plus ou moins faible. Ordinairement on n'emploie à cet effet que les sons les plus faibles, parce que ce sont en même temps les plus purs, et qu'on les reproduit plus fa-

(*) Cette remarque n'a pas échappé à M. Weber (*Annales de Poggendorff*, tome XVI), seulement M. Weber, en se fondant sur ce qui a lieu pour le son transversal d'un diapason et pour le son longitudinal d'une colonne d'air, crut devoir attribuer à tous les sons transversaux une tendance à monter quelle que soit la nature du corps qui leur donne naissance, et à tous les sons longitudinaux une tendance à baisser en s'affaiblissant.

(**) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, tome XL, page 192.

Digitized by Google

cilement avec le sonomètre, la sirène, ou avec l'instrument quelconque qui sert à la détermination du nombre de vibrations. On comprend donc qu'en opérant ainsi, on obtiendra toujours un coefficient d'élasticité trop élevé, et que cette différence ne disparaîtrait que si l'on pouvait, pour ces déterminations, se servir de sons tellement intenses, que leurs amplitudes fussent égales aux allongements et aux compressions considérables, que l'on emploie pour la détermination directe de ce même coefficient.

Pour éliminer ce coefficient d'élasticité statique et pour faire disparaître l'incertitude qui s'y rattache, j'ai toujours comparé entre elles les vibrations tournantes et longitudinales de chaque barre ; en appelant n le nombre de ces dernières vibrations lorsque la barre rend le son fondamental, on a, quelle que soit la section de la barre,

$$n = \frac{1}{2l}\left(\frac{E}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}, \tag{21}$$

et nous avons à trouver pour chaque forme de la section l'expression du nombre de vibrations tournantes n', et à vérifier par l'expérience le rapport théorique $\frac{n}{n'}$.

Les lois de ces deux espèces de vibrations dépendent d'une même équation différentielle, qui est, pour les vibrations longitudinales,

$$\omega^2 \frac{d^2\xi}{dx^2} = \frac{d^2\xi}{dt^2} \quad \text{ou} \quad \omega^2 = \frac{E}{\rho},$$

et, pour les vibrations tournantes,

$$\Omega^2 \frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{d^2\varphi}{dt^2},$$

où la valeur de Ω dépend de la forme de la section. Les extrémités étant libres, et la longueur la même dans les deux

Digitized by Google

cas, on a enfin

$$\frac{n}{n'} = \frac{\omega}{\Omega} = \left(\frac{E}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\Omega}. \tag{22}$$

XIX. — La condition d'équilibre d'un *cylindre circulaire* est donnée par l'équation (12); en mettant x à la place de l, elle s'applique à une section quelconque perpendiculaire à l'axe du cylindre : donc, en différentiant et mettant φ à la place de $\frac{\pi\psi}{180}$, on a

$$\frac{3}{16}\pi E r^4 \frac{d\varphi}{dx} = \mu(*),$$

d'où, en remplaçant les moments des forces par les moments d'inertie :

$$\frac{3}{8}\frac{E}{\rho}\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}, \quad \Omega = \left(\frac{3}{8}\frac{E}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

et

$$\frac{n}{n'} = \left(\frac{8}{3}\right)^{\frac{1}{2}} = 1,6331. \tag{23}$$

Cette formule n'est complétement exacte qu'autant que l'est l'équation (12) elle-même dont elle est déduite; dès que le diamètre est tellement considérable par rapport à la longueur, que le changement de volume cesse d'être négligeable, l'équation (12) prendra un coefficient de correction $c < 1$, et, par suite, on aura

$$\frac{n}{n'} = \frac{1,6331}{\sqrt{c}} > \left(\frac{8}{3}\right)^{\frac{1}{2}};$$

la même chose aurait lieu pour des vibrations tournantes d'une grande amplitude.

(*) *Mémoires de l'Académie des Sciences*, tome VIII, page 453.

Digitized by Google

Expériences sur les vibrations tournantes des cylindres circulaires.

NUMÉRO.	SUBSTANCE	LONGUEUR.	RAYON.	NOMBRE DE VIBRATIONS longitudinales n.	NOMBRE DE VIBRATIONS tournantes n'	$\frac{n}{n'}$.
		mm	mm			
1	Fer	2,061	8,220	1255,0	766,5	1,637
2	Fer	2,005	5,501	1267,3	771,1	1,643
3	Acier fondu..	2,000	5,055	1286,4	787,7	1,633
4	Cuivre jaune.	2,000	5,031	864,5	531,1	1,628

Il est probable que la valeur de ce rapport, un peu trop grande pour les plus gros cylindres, provient de ce que c n'est déjà pas rigoureusement égal à 1.

L'équation (22) s'applique également aux cylindres creux, puisqu'elle résulte de la formule (13) comme de celle (12); en effet, un tube de verre de $1^m,056$ de longueur a donné le rapport suivant :

$$\frac{n}{n'} = \frac{2509.8}{1542.2} = 1,627.$$

Je crois pouvoir recommander ce genre d'expériences aux personnes qui, sans se livrer à des recherches spéciales et à des calculs numériques toujours pénibles, désireraient pourtant vérifier l'exactitude de mes formules. On n'a qu'à prendre une barre de 2 mètres de longueur en bon fer, et à la faire vibrer d'abord longitudinalement; on obtiendra le même son sur le sonomètre en plaçant le chevalet mobile à une distance de 100 millimètres de l'un des chevalets fixes. (Nous supposons que l'on se sert du sonomètre ordinaire de 1 mètre de longueur, accordé sur le son *ut*, qui est de 128 vibrations doubles.) Si les deux sons n'étaient pas tout à fait identiques, on changerait la tension de la corde jusqu'à ce qu'il y ait une égalité parfaite. Maintenant placez le chevalet mobile à la distance de 158 millimètres : suivant

Digitized by Google

l'ancienne théorie, cette longueur de la corde correspondrait au son tangentiel du cylindre ; provoquez les deux sons à la fois, et l'oreille la moins exercée sentira parfaitement qu'il y a entre eux un intervalle considérable ; l'accord ne sera rétabli que lorsqu'on aura placé le chevalet mobile à la distance de 163 millimètres.

XX. — Pour les *cylindres elliptiques*, l'équation (14) donne de même

$$\frac{3}{8}\pi E\,\frac{c_1^3 c_2^3}{c_1^2+c_2^2}\,\frac{d^2\varphi}{dx^2}=\frac{\pi}{4}\rho\,(c_1^3 c_2+c_2^3 c_1)\,\frac{d^2\varphi}{dt^2};$$

$$\Omega=\left(\frac{3}{2}\,\frac{F}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{c_1 c_2}{c_1^2+c_2^2},$$

d'où

$$\frac{n}{n'}=\left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{c_1^2+c_2^2}{c_1 c_2}, \tag{24}$$

et cette équation revient à celle (23), lorsque l'on y met $c_1=c_2$; il faudra diviser le second membre de l'équation par $\sqrt{c}$ dans le cas où c ne serait pas égal à 1.

Expériences sur les vibrations tournantes des cylindres elliptiques.

N°.	SUBSTANCE.	LONGUEUR.	DEMI-AXES de la base		NOMBRES DE VIBRATIONS		RAPPORT $\frac{n}{n'}$.	
			c_1.	c_2.	longitudinales n.	tournantes n'.	Calculé.	Trouvé.
		m						
11	Acier fondu..	1,056,5	7,105	3,697	2370,4	1185,2	1,994	2,000
13	Cuivre jaune.	1,053,8	7,062	3,669	1651,6	805,0	1,996	2,052
12	Acier fondu..	1,049,6	9,900	2,5075	2370,4	699,5	3,430	3,389
14	Cuivre jaune.	1,053,8	9,875	2,498	1662,3	462,1	3,434	3,597

Le dernier cylindre présente seul un écart un peu notable entre les chiffres des deux dernières colonnes ; cette différence provient probablement de ce que sa base n'est pas une ellipse tout à fait régulière.

Digitized by Google

XXI. — L'équation (16) pour l'équilibre des *prismes rectangulaires* donne pour le cas du mouvement la suivante :

$$2\,E\,\frac{a^3\,b^3}{a^2+b^2}\,\frac{d^2\varphi}{dx^2}=\frac{4}{3}\,(a^3\,b+a\,b^3)\,\rho\,\frac{d^2\varphi}{dt^2},$$

d'où

$$\Omega=\left(\frac{3}{2}\,\frac{E}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{ab}{a^2+b^2}$$

et

$$\frac{n}{n'}=\left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{a^2+b^2}{ab}, \tag{25}$$

ou, en tenant compte du coefficient c,

$$\frac{n}{n'}=\left(\frac{2}{3\,c}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{a^2+b^2}{ab}. \tag{26}$$

Pour le *prisme carré*, on a $a=b$, et

$$\frac{n}{n'}=\left(\frac{8}{3\,c}\right)^{\frac{1}{2}}, \tag{27}$$

ou, en mettant $c=1$,

$$\frac{n}{n'}=\left(\frac{8}{3}\right)^{\frac{1}{2}}=1{,}6331\ (*);$$

les vibrations tournantes nous offrent donc un nouveau moyen de déterminer les différentes valeurs du coefficient de correction pour de très-petits angles de torsion.

Plusieurs des prismes déjà mentionnés avaient été ou rompus ou notablemeat déformés dans les expériences pré-

(*) M. Cauchy avait donné une valeur numérique différente de celle-ci ; la formule qui détermine le nombre des vibrations tournantes d'un prisme rectangulaire est, d'après M. Cauchy, la suivante :

$$n'=\left(\frac{8\,f}{3\,\rho}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{ab}{2\,l\,(a^2+b^2)}$$

dans laquelle $f=k=2K=\frac{2}{5}E$; après avoir substitué cette valeur de f

Digitized by Google

cédentes; d'autres, et notamment les carrés les plus minces et les lames les plus plates, n'ont pas rendu un son tangen-

---

dans la précédente équation, on trouve

$$\frac{n}{n'} = \left(\frac{15}{16}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{a^2 + b^2}{ab},$$

et pour le prisme carré

$$\frac{n}{n'} = \left(\frac{15}{4}\right)^{\frac{1}{2}} = 1,9364.$$

Si aux anciennes formules générales on substitue les nouvelles, on a

$$f = \frac{k}{2} = \frac{3}{8}E;$$

d'où

$$\frac{n}{n'} = \frac{a^2 + b^2}{ab},$$

et, pour $a = b$,

$$\frac{n}{n'} = 2.$$

Les quelques expériences que j'avais faites en 1849 sur les vibrations tournantes des verges carrées m'avaient donné en moyenne la valeur de $\frac{n}{n'} = 1,688$ (*Comptes rendus*, tome XXVIII, page 72); j'étais donc fondé à dire que le résultat des expériences ne s'accordait ni avec le rapport trouvé par M. Cauchy ni avec celui que l'on obtenait au moyen de ses formules modifiées par l'introduction de la nouvelle valeur de la constante, et à appeler sur ce point l'attention des géomètres.

Je crois pouvoir indiquer maintenant la cause de ce désaccord; je conserverai les numéros des équations et les notations de M. Cauchy en mettant seulement $e = f$, parce que nous ne nous occupons ici que des corps homogènes, et en supposant les forces accélératrices constantes. M. Cauchy donne les équations suivantes (*Exerc.*, tome IV, p. 54):

$$(34) \qquad B_{3,1} = -\frac{6}{h^2} B_{1,1}, \quad C_{1,2} = -\frac{6}{i^2} C_{1,1},$$

$$(35) \qquad D_{0,0} = -\frac{h^2}{2} D_{2,0} = -\frac{i^2}{2} D_{0,2} = \frac{h^2 i^2}{4} D_{2,2} = 0,$$

puisqu'on néglige les quantités du quatrième ordre, les demi-côtés h et i étant très-petits.

$$(40) \qquad F_{3,1} = -\frac{2}{h^2} F_{0,1}, \quad E_{1,2} = -\frac{2}{i^2} E_{1,0},$$

$$(42) \qquad \frac{dF_{0,1}}{dx} + B_{1,1} + D_{0,2} = \rho \frac{d^2 \eta_{0,1}}{dt^2}, \quad \frac{dF_{2,1}}{dx} + B_{3,1} + D_{2,2} = \rho \frac{d^2 \eta_{2,1}}{dt^2},$$

Digitized by Google

tiel suffisamment distinct pour qu'il pût être reproduit sur le sonomètre. Tous les sons, longitudinaux et tangentiels que j'ai inscrits dans le tableau suivant, étaient parfaitement nets et ont été vérifiés à plusieurs reprises.

---

(43) $\frac{dE_{0,1}}{dx} + D_{2,0} + C_{1,1} = \rho \frac{d^2 \zeta_{1,0}}{dt^2}$, $\frac{dE_{1,2}}{dx} + D_{2,2} + C_{1,2} = \rho \frac{d^2 \zeta_{1,2}}{dt^2}$.

En substituant dans les équations (42) et (43) les valeurs tirées des précédentes et en éliminant d'abord $B_{1,1}$ et $C_{1,1}$ entre ces quatre équations prises deux à deux et ensuite $D_{0,0}$ entre les deux équations qui résultent de cette élimination, on trouve l'équation

(49) $$\frac{2}{3} \frac{d(h^2 E_{1,0} - i^2 F_{0,1})}{dx} = \rho \frac{d^2 (h^2 \zeta_{1,0} - i^2 \eta_{0,1})}{dt^2}$$

en négligeant le terme

$$\frac{h^2 i^2}{6} \rho \left(\frac{d^2 \zeta_{1,2}}{dt^2} - \frac{d^2 \eta_{2,1}}{dt^2} \right)$$

comme étant du quatrième ordre par rapport aux côtés. Mais en recourant aux deuxièmes équations (42) et (43) et à celles (34), (35) et (40), on voit qu'on n'a pas le droit de négliger ce terme.

On évite cette difficulté en n'employant que les premières équations (42) et (43); après avoir multiplié la première par i^2 et la seconde par h^2, on peut négliger les termes $i^2 B_{1,1}$, $i^2 D_{0,2}$, $h^2 D_{2,0}$ et $h^2 C_{1,1}$, et l'on a

$$\frac{d(h^2 E_{1,0} - i^2 F_{0,1})}{dx} = \rho \frac{d^2 (h^2 \zeta_{1,0} - i^2 \eta_{0,1})}{dt^2}.$$

L'équation (53) est alors remplacée par la suivante :

$$4 f \frac{h^2 i^2}{h^2 + i^2} \frac{d^2 \psi}{dx^2} = \rho (h^2 + i^2) \frac{d^2 \psi}{dt^2},$$

laquelle devient identique avec la nôtre en y mettant a, b et φ à la place de b, i et ψ et $\frac{3}{8}$ E au lieu de f.

Digitized by Google

Expériences sur les vibrations tournantes des prismes rectangulaires.

NUMÉRO.	SUBSTANCE.	RAPPORT approximatif des côtés.	DEMI-CÔTÉS DE LA BASE		LONGUEUR.	NOMBRE DE VIBRATIONS		RAPPORT $\frac{n}{n'}$.		COEFFICIENT de correction
			a.	b.		longitudinales n.	tournantes n'.	Calculé d'apr. la formule (25)	Trouvé.	c.
					m					
15	Fer.....		12,4125	12,4125	1,102,5	2306,3	1319,6	1,633	1,748	0,873
16	Id.....		9,877	9,877	"	"	1347,4	"	1,712	0,910
17	Id.....		7,5325	7,485	1,104,5	2265,5	1333,3	"	1,699	0,924
42	Cristal.....	1	6,8015	6,798	1,285,0	1580,2	930,9	"	1,697	0,925
43	Id.....		6,9095	6,708	1,234,0	1630,6	966,0	1,634	1,688	0,937
27	Fer.....		5,3385	5,310	1,702,0	1497,1	882,9	1,633	1,696	0,927
18	Id.....	1 1/2	11,990	7,913	1,108,0	2285,7	1196,3	1,776	1,910	0,864
19	Id.....		11,915	5,982	"	"	1062,2	2,036	2,152	0,895
32	Acier fondu.....	2	4,515	2,014	0,978,0	2585,9	1153,2	2,195	2,242	0,958
20	Fer.....	3	12,060	3,986	1,108,0	2285,7	800,0	2,740	2,857	0,920
38	Cuivre jaune.....	3 1/2	7,459	2,071	2,000,0	892,0	282,6	3,167	3,157	1,007
48	Verre à glaces.....		15,850	4,040	1,938,0	1641,0	465,5	3,411	3,526	0,936
21	Fer.....	4	11,940	2,982	0,956,0	2585,9	727,3	3,473	3,556	0,954
33	Acier fondu.....		6,017	1,5165	1,031,5	2461,5	684,5	3,445	3,596	0,918
36	Acier Huntsman...	4 1/2	13,640	3,0145	1,000,0	2485,4	627,4	3,875	3,961	0,957
29	Fer.....		7,480	1,596	2,000,0	1230,8	294,7	4,001	4,176	0,918
22	Id.....	5	11,900	2,421	0,922,0	2694,7	630,5	4,179	4,274	0,956
23	Id.....	6	11,950	1,968	0,960,0	2585,9	494,2	4,944	5,232	0,893
24	Id.....	8	11,960	1,450	0,962,0	"	362,6	6,861	7,131	0,926
34	Acier fondu.....	8 1/2	9,0015	1,052	0,986,5	2560,0	353,6	7,082	7,240	0,957
25	Fer.....	12	11,975	1,0415	0,973,0	2585,9	256,0	9,688	10,101	0,920

Digitized by Google

Ces coefficients ne diffèrent pas beaucoup de ceux que nous avons trouvés précédemment pour les mêmes pièces lorsqu'elles n'avaient été soumises qu'à de faibles torsions (XV, 5), mais ils sont plus grands numériquement que ceux que nous avions trouvés pour les angles moyens; ce qui devait être. En général, toutes les remarques que nous avons faites au sujet de l'influence qu'exercent la forme de la section, les grandeurs absolues de trois côtés, et l'angle de torsion ou l'amplitude des oscillations se trouvent confirmées de nouveau; seulement les vibrations tournantes constituent un moyen d'investigation bien moins délicat que l'équilibre de torsion, car la finesse de l'oreille ne pourra jamais égaler l'exactitude d'un cercle divisé, et en outre les vibrations ne donnent directement que la racine carrée du coefficient de correction.

Il est à remarquer que pour toutes les pièces, cylindres ou prismes, le son tangentiel s'accorde non-seulement avec les résultats des expériences d'équilibre, mais encore avec le son longitudinal; de sorte que si l'on voulait maintenir la théorie de l'accélération de ces dernières vibrations, soit par suite de la chaleur dégagée, soit par toute autre cause, on serait obligé d'attribuer aux vibrations tournantes cette même accélération, ce qui est d'autant moins possible que la théorie de ces dernières est précisément fondée sur la supposition qu'elles ont lieu sans que le corps éprouve aucun changement de densité. C'est une nouvelle preuve que les vibrations longitudinales elles-mêmes n'éprouvent aucune accélération de ce genre et que la différence faible, mais constante, qui existe à leur égard, entre le calcul et l'expérience, tient uniquement à la manière dont on détermine le coefficient d'élasticité qui entre dans la formule.

En résumé, le problème des vibrations tournantes ne présente aucune difficulté qui lui soit propre; celles que l'on

Digitized by Google

y rencontre encore proviennent de la solution incomplète du problème de statique qui lui correspond.

Sur la rupture des corps homogènes produite par la torsion.

XXII. — La rupture, quel que soit le mode d'action de la force qui la produise, n'est jamais un de ces phénomènes constants qui se prêtent facilement à l'application du calcul; les plus petits défauts d'homogénéité dans la matière, les déformations permanentes qui la précèdent et les circonstances particulières qui l'accompagnent, exercent une influence considérable qui échappe au calcul. Par ces raisons, on a été obligé, soit de faire certaines hypothèses plus ou moins arbitraires, soit d'avoir recours à l'ancienne théorie des filets, soit même d'enregistrer simplement les résultats des expériences, afin de s'en servir dans la pratique toutes les fois que les circonstances seraient les mêmes.

Une première preuve de l'insuffisance de la théorie que l'on a admise jusqu'ici, se trouve dans l'influence supposée nulle, mais réellement très-grande, qu'exerce la longueur de la pièce.

Une autre preuve est fournie par ce fait, que la rupture a lieu presque rigoureusement au milieu de la pièce, toutes les fois que l'expérience est bien faite.

En effet, si la torsion pouvait être ramenée à de simples rotations, il n'y aurait aucune raison pour que la rupture se fît en une section plutôt qu'en une autre, et pourvu que le déplacement angulaire proportionnel restât le même, la rupture de la pièce, quelle que soit sa longueur, devrait toujours avoir lieu sous l'action du même couple.

Il n'en est plus ainsi lorsqu'on tient compte de la diminution de volume : la contraction transversale étant la plus forte au milieu, c'est là que la pièce doit se rompre, et l'allongement des couches extérieures du ménisque étant proportionnel à la longueur, celle-ci ne peut pas être

Digitized by Google

sans influence. Voici du reste quelques expériences qui prouvent cette influence; nous désignons par p' le poids dont le moment $p'R$ produit la rupture :

Substance.	Cristal N° 42.		Verre à base de potasse N° 47.		Verre à base de soude N° 45.	
Longueur.	592	952	505	799	534	1027
p'.....	6,2	5,0	2,5	1,7	4,7	3,2

Pour éviter cette cause d'erreur, dont on ne pourrait pas tenir compte dans le calcul, j'ai fait les expériences suivantes sur la longueur constante de $0^m,5$.

Si maintenant on observe la manière dont la rupture se fait dans les différents corps, on remarque que les uns, ceux que nous appelons *roides,* se rompent brusquement à travers toute leur épaisseur et sans avoir éprouvé des déformations bien notables, tandis que d'autres, les corps mous, se rompent lentement, par parties, et après avoir été tordus, de manière que leur surface présente souvent des hélices d'un très-petit pas. Nous sommes obligé d'établir cette distinction, quoiqu'il n'y ait dans la nature ni des corps absolument roides et qui ne soient susceptibles d'aucun déplacement permanent, ni des corps solides absolument mous, lesquels pourraient être tordus à l'infini sans jamais se rompre; nous considérerons les corps comme appartenant à l'une ou à l'autre catégorie, selon qu'ils sont plus voisins de l'une ou de l'autre limite.

XXIII. — La rupture des corps *roides* a lieu par glissement, selon l'expression de Navier, ou par déplacement tangentiel; le point que M. Poncelet appelle le *point dangereux,* celui où la rupture commence, est donc le point qui éprouve le plus fort glissement, et puisque les corps roides, tels que le verre, l'acier trempé, la cire à cacheter (*), n'éprouvent avant la rupture presque aucune altération dans leur forme, nous pourrons nous aider de la figure de

(*) M. Poncelet a bien voulu me conseiller l'emploi de cette substance.

Digitized by Google

la surface de rupture pour déterminer la position de ce point.

Considérons d'abord un cylindre plein dont l'axe coïncide avec l'axe de torsion ; si la rupture avait lieu au même instant à travers toute la section du cylindre, la surface de rupture représenterait nécessairement la surface des plus grands déplacements dans le cylindre tordu, et l'on obtiendrait très-probablement les deux surfaces *cd* et *c' d'*, *fig.* 8, qui se détacheraient en même temps du ménisque intermédiaire. Mais quelque rapide que soit la rupture, elle n'est pas instantanée et la torsion peut exercer son effet de couche en couche depuis la circonférence jusqu'au centre du cylindre, toutes les couches concentriques devenant successivement des cercles du plus grand glissement.

D'après nos résultats précédents, ce glissement a lieu suivant deux directions perpendiculaires : dans le sens de la tangente à la surface et dans le sens du rayon. Au premier de ces déplacements correspondrait une rupture perpendiculaire à la direction de la fibre tordue en hélice, au second une séparation des couches parallèlement à l'axe, et la coïncidence de ces deux modes de rupture paraît donner naissance à la surface de rupture que l'on observe et qui est une surface conique couverte de stries hélicoïdales, et dont le sommet se trouve sur l'axe du cylindre ou un peu en dehors selon que l'axe de torsion coïncidait plus ou moins exactement avec celui-ci. Nous avons reproduit cette surface aussi fidèlement que possible, *fig.* 10, d'après la rupture d'un cylindre en cire; je l'ai également obtenue avec des cylindres de verre d'un petit diamètre après avoir eu soin d'en fixer avec du mastic les extrémités encastrées, afin qu'elles ne pussent ni glisser ni s'écraser.

On prévoit facilement quelle doit être maintenant la surface de rupture du prisme carré ou rectangulaire : les points du plus grand glissement, ceux qui décrivent les arcs de cercle du plus grand rayon, se trouvent à l'extrémité des

Digitized by Google

diagonales de chaque section droite; la rupture commencera donc au milieu du prisme et par les quatre angles à la fois: de chaque angle partira une surface légèrement hélicoïdale, dont l'intersection avec les deux surfaces voisines fera naître deux arêtes plus ou moins arrondies, placées à peu près sur le milieu des faces des prismes, et ces quatre surfaces se réuniront en un sommet situé sur l'axe de torsion; la *fig.* 11 est la reproduction des quatre faces d'un prisme carré en verre, rompu par la torsion.

Cette figure rappelle les pointements octaédriques que l'on obtient en cristallographie, lorsque sur les angles d'un prisme à base carrée ou rectangulaire on place des plans plus ou moins inclinés sur l'axe et parallèles aux diagonales de la base; seulement ces plans sont ici remplacés par des surfaces à double courbure.

Mais on ne réussit que rarement à faire coïncider l'axe de torsion avec l'axe de figure, à tel point que la rupture ait lieu par les quatre angles à la fois. Supposons donc que l'axe de torsion occupe la position excentrique o', *fig.* 9, les points dangereux seront en a et en b, et de ces deux points placés sur les deux arêtes d'une même face, mais non dans la même section transversale, partiront deux surfaces hélicoïdales, tournées en sens inverse; on obtient ainsi la surface constante et tout à fait caractéristique que nous avons reproduite en a et b, *fig.* 12. Elle est doublement hélicoïdale, présentant une hélice convexe suivant le diamètre mn et une hélice concave suivant pq. De ses quatre côtés, deux, mp et nq, placés dans deux faces parallèles, sont courbes et égaux entre eux, si ce n'est que leurs courbures sont dirigées en sens inverse; le troisième mq représente une doucine, et le quatrième np est sensiblement droit et plus ou moins incliné sur l'axe, selon que la base du prisme est un rectangle plus ou moins allongé.

Ce que cette surface présente de remarquable, c'est la symétrie complète de tous ses éléments, l'hélice convexe

Digitized by Google

correspondant parfaitement à l'hélice concave, les courbures des diagonales *mn* et *pq* étant les mêmes, la droite enfin et la doucine étant retournables par leur nature même, si bien qu'en laissant en place l'un des deux fragments du prisme et renversant l'autre sens dessus dessous et bout pour bout, on a sous les yeux deux surfaces parfaitement superposables. Remarquons encore que la partie *nop*, *fig.* 12*a*, est tout à fait lisse, tandis que tout le reste de la surface est sillonné de stries, dirigées vers cette partie lisse.

Cette surface mériterait certainement d'être traitée analytiquement; mais actuellement il nous suffit d'avoir démontré que dans les corps roides la rupture commence toujours par les points les plus éloignés de l'axe de torsion et que la formule de Navier doit être applicable à ces corps.

Nous avons donc pour un *cylindre*, d'après les équations (2), la force tangentielle à la circonférence

$$P_1 = R_3 = \frac{k}{2} r\alpha,$$

puisque nous supposons les corps homogènes et que nous négligeons les déplacements parallèles à l'axe, de même que ceux qui ont lieu dans le sens du rayon. Soit T la force tangentielle par unité de surface qui produit la rupture par glissement, on aura l'équation

$$T = \frac{k}{2} r\alpha = \frac{3}{8} E r\alpha,$$

où α représente l'angle proportionnel qui accompagne la rupture; après avoir mis dans l'équation (12) α à la place de $\frac{\pi}{180} \frac{\psi}{l}$, et après avoir éliminé α entre ces deux équations, on a

$$T = \frac{2}{\pi r^3} p' R. \tag{28}$$

Digitized by Google

A l'appui de cette formule, je citerai une expérience sur un cylindre en verre à vitres où l'on avait $r = 3,422$ et $p' = 0,8$, d'où $T = 3,14$.

Pour comparer cette valeur avec celles que l'on obtient par les compressions ou par les allongements, nous n'avons pas besoin de supposer avec Navier qu'elles sont entre elles dans le même rapport que les quantités désignées par k et par E. En effet, dans ces dernières expériences faites sur des corps roides, la rupture n'a jamais lieu ni par un véritable écrasement du corps comprimé ni par un déchirement du corps allongé, mais bien par le glissement d'une partie sur l'autre, et la surface de rupture est toujours plus ou moins inclinée sur l'axe.

Nous pouvons donc comparer notre valeur de T directement avec les coefficients de rupture que l'on a trouvés par ces expériences, et l'on voit qu'elle s'écarte peu du coefficient de rupture par écrasement, mais qu'elle est de beaucoup supérieure au coefficient de rupture par l'allongement : ce qui devait être. Mais il ne faut pas perdre de vue que cette coïncidence ne peut avoir lieu qu'autant que nos formules restent approximativement applicables. Au contraire, pour les pièces de grandes dimensions, dans lesquelles la contraction transversale cesse d'être négligeable, la rupture aura lieu sous un moment beaucoup plus petit que celui de la formule (28) ; en effet, toutes les expériences en grand que l'on a faites sur des arbres en fonte ont donné des valeurs de T de beaucoup inférieures à celles qui résultent de l'écrasement de la même substance, et l'on remarque entre ces deux valeurs un écart d'autant plus considérable que les arbres avaient été d'un plus fort diamètre (*).

Pour les tubes, on trouve de la même manière :

$$(29) \qquad T = \frac{2 r_1}{\pi (r_1^4 - r_2^4)} p' R.$$

(*) Morin, *Résistance des matériaux*, page 450.

Digitized by Google

Nous pouvons citer comme exemple un tube en tôle (n° 10), qui avait été tellement écroui par l'étirage, qu'il s'est rompu subitement comme un corps rigide, et avant d'avoir subi une torsion permanente quelque peu notable. Ses rayons étaient $r_1 = 6,7675$, $r_2 = 5,8325$; on a trouvé $p' = 20,0$, d'où $T = 22,68$.

La si petite valeur de ce coefficient prouve de nouveau que la substance de ces tubes ne peut pas être assimilée au fer. La ligne de rupture de ce tube se compose de deux demi-cercles *ab* et *cd*, *fig.* 13, assez éloignés l'un de l'autre, perpendiculaires à la direction des fibres tordues, dirigés en sens inverse et réunis par une ouverture *ac*, parallèle à l'axe; son ensemble rappelle donc une doucine assez allongée : ce qui prouve que cette ligne n'appartient pas exclusivement aux surfaces de rupture des prismes, mais qu'elle se forme toutes les fois que la rupture commence par deux points ou par deux lignes qui n'appartiennent pas à la même section transversale.

Pour *les prismes rectangulaires* Navier a déduit des formules de M. Cauchy l'expression suivante :

$$(30) \qquad T = \frac{3}{8} \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{a^2 b^2} p' R,$$

en supposant que la rupture commence au point le plus éloigné qui décrit un arc de cercle du rayon $\sqrt{a^2 + b^2}$; voici quelques expériences de vérification :

Digitized by Google

NUMÉRO.	SUBSTANCE.	DEMI-CÔTÉS		p'	T.
		a.	b.		
39	Flint.....	11,4255	10,550	19,25	1,91
41	Cristal.....	7,182	7,138	6,25	2,24
42		6,8015	6,798	6,50	2,71
43		6,9095	6,708	5,40	2,25
44	Verre à base de soude.	6,309	5,913	4,25	2,45
45		5,988	5,875	3,80	2,39
47	Verre à base de potasse	4,820	4,710	2,55	3,09
49	Verre à glaces...	15,750	3,989	6,50	2,37
52	Verre à vitres.....	15,200	1,483	1,10	3,07

Ces valeurs de T suivent pour les différentes espèces de verre le même ordre que celles que l'on obtient par la rupture au moyen d'une traction longitudinale (*), et elles s'accordent généralement avec les résultats des expériences faites au moyen de la compression (**), quoique celles-ci n'aient pas toujours été poussées jusqu'à la rupture.

XXIV. — Il nous reste à parler des corps *mous* qui se déforment plus ou moins, mais toujours d'une manière très-sensible avant de se rompre. Déjà nous avons fait observer (VIII, 2°) que dans ces corps l'augmentation graduelle de l'angle moyen de torsion ne se maintient pas jusqu'à la rupture, et que cette marche ascendante est remplacée par une diminution graduelle dès que les déformations permanentes deviennent un peu considérables. Ce fait provient certainement en partie de ce que le corps n'obtient plus une véritable position d'équilibre, et qu'alors une partie du travail du couple est employée à produire des déplacements permanents successifs, ou, en d'autres termes, de ce que la barre

(*) Chevandier et Wertheim, *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, tome XIX, page 133.

(**) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, tome XL, page 212.

Digitized by Google

file en se tordant; mais une autre cause qui échappe actuellement encore au calcul se trouve dans la résistance plus grande qu'opposent à la torsion des corps dont chaque fibre est déjà disposée en hélice. Pour en citer un exemple, j'ai observé les couples qu'il a fallu appliquer successivement à la barre de fer doux n° 27 pour augmenter chaque fois sa torsion permanente θ de quatre angles droits :

Nombre de tours...	1	2	3	4	5
P.....	27,0	29,5	34,5	39,0	43,5

La théorie des filets pourrait, jusqu'à un certain point, rendre compte de ce fait : l'angle permanent étant $= \theta$, la longueur actuelle de la fibre placée à la distance ρ de l'axe est égale à $l + \frac{\rho^2 \theta^2}{2l} = l'$, et une nouvelle torsion φ produira un allongement proportionnel, $\frac{\lambda}{l'} = \frac{\rho^2 \varphi^2}{2 l'^2}$, beaucoup plus petit que $\frac{\lambda}{l}$, si θ est grand.

Quoi qu'il en soit, l'expérience que nous venons de citer prouve suffisamment qu'en voulant appliquer les formules du paragraphe précédent on obtiendrait des valeurs de T très-différentes selon que le corps se serait rompu pendant le premier tour ou pendant l'un des suivants. Cela prouve que la rupture n'a plus lieu par suite du glissement, mais bien par suite de l'allongement réel et permanent des fibres et cet allongement étant le plus considérable pour les fibres; les plus éloignées de l'axe, c'est par celles-ci que la rupture doit commencer. On peut s'en convaincre facilement en soumettant à la torsion des prismes plats en fer doux : la rupture ne se propageant que lentement à travers toute la section, on peut, en enlevant rapidement les poids, l'arrêter avant qu'elle soit parvenue jusqu'à l'axe de torsion, et l'on voit alors que la barre est rompue par l'un des petits côtés ou par les deux petits côtés à la fois, tandis qu'elle est encore intacte au milieu des grands côtés.

Digitized by Google

Les différentes substances que nous considérons comme molles ne le sont pas au même degré et présentent, à cet égard, certaines particularités.

L'acier fondu non trempé peut être considéré comme formant la transition des substances roides aux molles; tout en étant susceptible de prendre des déformations permanentes très-considérables, cet acier présente des surfaces de rupture pareilles à celles des corps roides et dans lesquelles l'influence du glissement est encore sensible.

Les barres carrées en acier fondu reproduisent très-exactement la surface de rupture des verres, *fig.* 12; les plates se rompent souvent d'une manière tellement régulière, qu'il en résulte deux fragments à pointements pareils à celui de la *fig.* 11 et deux coins acb et $a'cb'$, *fig.* 14, qui représentent le ménisque intermédiaire.

Le fer fibreux se rompt par l'allongement des fibres extrêmes; longtemps avant la rupture on y remarque souvent des fentes profondes et parallèles à l'axe, surtout vers le milieu des petites faces des prismes; elles proviennent de ce que la cohésion latérale des fibres les plus allongées a été détruite par leurs glissements successifs ou, en d'autres termes, de ce que ces fibres ont été détachées l'une de l'autre parallèlement à l'axe par le glissement avant d'être rompues par allongement et perpendiculairement à l'axe.

Enfin, le fer très-doux et le cuivre jaune s'enroulent pour ainsi dire à l'infini et ne se rompent que par suite d'un défaut d'homogénéité.

Les formules du précédent paragraphe, basées sur le glissement, ne sont plus applicables dans le cas actuel, mais il est facile d'en déduire celles (*) qui conviendraient à la rupture par allongement si celui-ci n'était accompagné d'aucune déformation. En effet, soit K le coefficient de rupture du corps par traction longitudinale, la rupture par torsion

(*) Weisbach, *Mécanique*, tome I, page 297.

Digitized by Google

aura lieu lorsque l'allongement proportionnel $\frac{\lambda}{l}$ sera égal à $\frac{K}{E}$; soit ρ la distance de la fibre à l'axe : on a

$$\frac{\lambda}{l} = \frac{\rho^2 \alpha^2}{2}$$

et

$$\rho\alpha = \left(\frac{2K}{E}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{8}{3}\frac{T}{E};$$

donc T ayant été calculé au moyen de l'une des équations (28), (29) ou (30) on trouvera K par l'équation suivante :

$$(31) \qquad K = \frac{2\left(\frac{4}{3}T\right)^2}{E} = \frac{32}{9}\frac{T^2}{E}.$$

Les expériences suivantes sont destinées seulement à faire voir que ces formules ne s'appliquent pas aux corps mous.

NUMÉRO	SUBSTANCE.	DEMI-CÔTÉS		p'	T.
		a.	b.		
27	Fer doux.....	5,3385	5,310	44,0	38,27
21	Fer.	11,940	2,982	73,0	65,77
22	Id.....	11,900	2,421	51,5	69,93
23	Id.....	11,950	1,568	37,0	75,20
24	Id	11,960	1,450	19,5	72,50
25	Id.....	11,975	1,0415	12,5	89,65
26	Id.....	11,940	0,518	6,5	188,48
31	Acier fondu.....	3,0025	3,0005	16,0	77,66
32	Id.....	4,515	2,014	15,3	84,90
33	Id.....	6,017	1,5165	15,0	103,76
34	Id..... ...	9,0015	1,052	16,5	154,77
35	Id.....	17,997	0,538	22,5	401,06
37	Cuivre jaune....	1,814	1,783	1,9	42,89

Ainsi donc, que l'on considère la rupture comme produite par le glissement ou par l'allongement, les valeurs de

Digitized by Google

T et K ne sont jamais ni constantes pour une même matière, ainsi que cela devrait être si les formules étaient exactes, ni conformes aux expériences directes, puisque les T sont toujours trop grands et que les K seraient de beaucoup trop petits, à cause de la grande valeur du coefficient d'élasticité E.

Nous avons prévu ce désaccord, qui ne présente, du reste, aucun inconvénient pour la pratique où l'on fixe arbitrairement un angle limite de la torsion élastique et où l'on se servira avec d'autant plus de sécurité du fer doux, par exemple pour des tiges de sonde, que l'on sera certain qu'une première déformation permanente, loin d'affaiblir la pièce, tend au contraire à lui donner une plus grande résistance à la torsion.

On voit, du reste, par ce tableau que les prismes carrés fournissent des valeurs de T qui ne sont pas trop éloignées de leurs coefficients de rupture par l'allongement, et que pour les prismes plats les p' sont sensiblement proportionnels aux sections, ce qui est suffisant pour guider dans la pratique.

Conclusions.

XXV. — Pour mieux résumer les résultats de nos expériences, nous les partageons en deux groupes, dont le premier comprend les faits que l'on observe dans tout corps tordu, quelle que soit sa forme, tandis que le second contient les résultats relatifs à chaque figure particulière de la section transversale.

A. Lorsqu'on soumet à la torsion un corps quelconque à trois dimensions finies on observe les faits suivants :

1°. L'angle de torsion se compose de deux parties, l'une temporaire, l'autre permanente; cette dernière augmente d'une manière continue, mais non régulière, depuis les torsions produites par les couples les plus faibles jusqu'à celles qui font naître la rupture.

2°. Les angles de torsion temporaires ne sont pas rigou-

Digitized by Google

reusement proportionnels aux moments des couples; ils augmentent plus rapidement que ceux-ci, et cet accroissement de l'angle moyen qui dans les corps roides s'étend jusqu'à la rupture, s'arrête dans les corps mous aux couples sous l'action desquels ces corps commencent à se déformer d'une manière rapide et continue.

3°. Ces angles temporaires ne sont pas rigoureusement proportionnels aux longueurs; ramenés à l'unité de longueur, suivant cette loi de proportionnalité, on les trouve d'autant plus grands, tout étant égal du reste, que la pièce soumise à l'expérience a été plus courte.

4°. Tout corps homogène éprouve par suite de la torsion une diminution de volume qui est proportionnelle à sa longueur et au carré de l'angle de torsion, et chaque point du corps, au lieu de décrire un arc de cercle, parcourt réellement un arc de spirale et très-probablement même un arc d'hélice conique. La longueur du corps restant constante, celui-ci éprouve nécessairement une condensation croissante du centre à la circonférence.

Cette proposition se rattache aux deux précédentes : en effet, la proportionnalité supposée entre les angles de torsion d'un côté et les moments des couples et les longueurs de l'autre côté ne peut pas avoir lieu dès que le corps change de dimensions et cesse d'être homogène par suite de la torsion elle-même; cette proportionnalité ne saurait être considérée que comme la limite vers laquelle tendent les angles à mesure que diminuent les intensités des couples et les dimensions du corps qui sont perpendiculaires à l'axe de torsion. Les formules que l'on trouve en admettant cette proportionnalité ne peuvent donc s'accorder avec les expériences qu'autant que celles-ci s'écartent peu de cette limite.

5°. Dans les corps à trois axes d'élasticité, le changement de volume et la résistance à la torsion sont des fontions des trois axes et non pas seulement des deux axes transversaux;

Digitized by Google

l'état actuel de la théorie ne permet de faire que des calculs approximatifs, mais l'expérience démontre que le rapport de ces trois axes peut être tel, que le changement de volume change de signe et devienne une augmentation.

6°. Nous ne pouvons provoquer généralement que des vibrations tournantes d'une faible amplitude; les angles de torsion restent donc toujours très-petits, et par conséquent l'une des deux conditions que nous venons de rappeler se trouve remplie par suite de la nature même du phénomène. Il en est de même de la seconde condition, puisque nous ne saurions faire rendre un son tangentiel à des barres épaisses et relativement courtes; aussi les nombres de vibrations tournantes s'écartent-ils peu de leurs valeurs calculées d'après les formules auxquelles on arrive dans la théorie généralement admise. Seulement, il faut remarquer que l'élévation du son tangentiel n'étant pas réellement indépendante de son intensité, il tend à monter à mesure qu'il s'affaiblit. Le même accord existe entre les rapports théorique et expérimental des nombres de vibrations longitudinales et tournantes; et puisque dans ce calcul les vibrations tournantes sont supposées n'être accompagnées d'aucun changement de volume, il s'ensuit que les condensations et les dilatations dont se composent les vibrations longitudinales ne peuvent pas être cause non plus d'aucune accélération du son longitudinal : donc si le nombre de ces vibrations, calculé d'après la formule connue, se trouve généralement trop petit, il ne faut attribuer ce désaccord qu'à la manière dont on détermine statiquement la valeur du coefficient d'élasticité.

7°. La rupture produite par la torsion a généralement lieu au milieu du prisme, et elle commence par les lignes dangereuses ou par les points dangereux, suivant l'expression de M. Poncelet, c'est-à-dire par les points de la section transversale qui se trouvent à la plus grande distance de l'axe de torsion; elle s'opère par glissement dans les corps roides, et par allongement dans les substances molles.

Digitized by Google

Pour les premiers, le moment du couple qui produit la rupture peut se calculer avec une approximation suffisante; et le résultat des expériences prouve que cette rupture doit être assimilée à un écrasement, au moins au moment où elle commence. Dans ces dernières, au contraire, les torsions permanentes qui précèdent la rupture, et dont l'influence et les limites sont inconnues, rendent le moment de la rupture tout à fait incertain et variable ; pour la pratique, il suffira de savoir qu'une pièce qui a déjà subi une torsion permanente présente à la torsion temporaire une résistance non-seulement égale, mais même supérieure à celle qu'elle avait avant sa déformation.

8°. Tous les résultats obtenus soit par l'allongement, soit par les torsions statiques, soit par les vibrations tournantes des corps homogènes, s'accordent avec les nouvelles valeurs des constantes qui entrent dans les équations générales de l'équilibre et du mouvement de ces corps, et se trouvent en opposition avec les valeurs de ces constantes telles qu'on les avait précédemment admises.

B. En ce qui concerne l'influence de la figure et des dimensions absolues de la section transversale, nous arrivons aux conclusions suivantes :

9°. Dans les *cylindres homogènes à base circulaire* la diminution de volume est égale au volume multiplié par le produit des carrés du rayon et de l'angle de torsion, par rapport à l'unité de longueur (cet angle est toujours très-petit).

Par conséquent, si l'on suppose que le corps conserve sa forme cylindrique, et que la condensation est également répartie sur toute sa masse, le rayon du cylindre tordu sera égal à son rayon primitif multiplié par le sinus de l'angle d'inclinaison de l'hélice en laquelle se transforme la génératrice de ce cylindre; ou, avec une approximation plus grande, la diminution de volume est au volume comme le

Digitized by Google

rayon de la base du cylindre est au rayon de courbure de cette hélice.

Mais en réalité chaque point éprouve un déplacement suivant les trois coordonnées semi-polaires, et le cylindre dont les deux extrémités sont maintenues à une distance invariable l'une de l'autre, se transforme en un solide composé de deux cônes égaux, tronqués et accouplés par leurs petites bases.

L'influence que ce changement de forme exerce sur les angles de torsion ne devient négligeable ou, pour parler plus exactement, ne rentre dans la limite des erreurs que comporte la précision de nos expériences actuelles, qu'à partir d'une longueur égale au moins à cent fois le diamètre ; au-dessous de cette limite, cette influence devient de plus en plus sensible à mesure que la longueur est un plus petit multiple du diamètre, et l'erreur qui en résulte est si grande déjà pour les dimensions habituelles des arbres employés dans les machines, qu'elle enlève à ces formules toute leur valeur pratique.

Cette même limite s'applique aux vibrations tournantes ; la surface de rupture des cylindres, dont la substance est roide et cassante, est conique et sillonnée de stries hélicoïdales indiquant le double glissement qui a produit la rupture.

10°. Pour les *cylindres elliptiques* l'influence du changement de forme est négligeable lorsque la longueur est égale au moins à cent fois le petit axe.

11°. En ce qui concerne les *prismes homogènes à base rectangulaire* la diminution de volume paraît être proportionnelle à la quatrième puissance du carré de la demi-diagonale de la base, divisée par le carré de l'aire de cette base ; elle augmente donc pour des prismes de plus en plus plats, tout étant égal du reste.

La formule de M. Cauchy correspond à la limite où l'influence des angles disparaîtrait par suite de la grande longueur du prisme ; dans l'état actuel de la théorie, nous

Digitized by Google

sommes obligés d'introduire dans cette formule un coefficient de correction plus petit que l'unité, mais dont la valeur numérique se rapproche de plus en plus de l'unité à mesure :

(*a*) Que la longueur augmente, et que le moment du couple diminue, tout étant égal du reste ;

(*b*) A égales longueur et largeur, à mesure que l'épaisseur diminue ;

(*c*) A égale longueur et à égalité d'aire de la section transversale, à mesure que l'un des côtés de celle-ci devient un multiple plus grand de l'autre ;

(*d*) A égale longueur et pour des sections semblables, à mesure que la longueur absolue des côtés devient plus petite.

Ces résultats sont confirmés par mes expériences sur des prismes creux, et par celles qui portent sur les vibrations tournantes.

Les prismes de substances cassantes montrent une surface de rupture qui rappelle le pointement octaédrique bien connu, que l'on obtient en cristallographie, lorsque sur les angles d'un prisme carré ou rectangulaire on place des plans plus ou moins inclinés sur l'axe et parallèles aux diagonales de la base ; seulement ces plans sont ici remplacés par des surfaces courbes. Lorsque l'axe de torsion ne coïncide pas rigoureusement avec l'axe de figure, on obtient sur les deux fragments deux surfaces inversement superposables et à double courbure hélicoïdale, dont l'une est convexe et l'autre concave.

Avant de se rompre, les prismes dont la substance est fibreuse et susceptible d'acquérir des déformations considérables, se fendent parallèlement à la direction des fibres tordues ; cela a lieu surtout dans le voisinage de celles qui se trouvent à la plus grande distance de l'axe de torsion. Cette disjonction latérale provient du glissement des fibres, et l'on peut dire que ces prismes se rompent transversale-

Digitized by Google

ment par le glissement, longtemps avant de se rompre longitudinalement par l'allongement.

12°. Nous ne sommes pas encore en état de déterminer, à l'aide du calcul, le moment de la résistance à la torsion d'un *prisme rectangulaire à trois axes d'élasticité* (5°). Lorsqu'il s'agit de prismes en bois, et qu'en négligeant l'inégalité de ces axes comme on le fait habituellement, on introduit dans le calcul le coefficient de l'élasticité longitudinale, on trouve un angle qui n'est que le sixième et même le dixième de l'angle réel de la torsion. L'introduction des coefficients des deux élasticités transversales nous a fourni des résultats plus rapprochés, mais encore inexacts : ce qui devait être, puisque l'influence du troisième axe n'est pas négligeable.

Désignation des lettres employées dans les tableaux suivants.

N et n, numéros de la pièce et du tube capillaire.

l, longueur comprise entre les deux cercles divisés de l'appareil à torsion.

l_1, longueur de la cavité intérieure d'une pièce creuse.

L_1, longueur comprise entre les deux points de repère d'une pièce que l'on soumet à l'allongement.

L, longueur comprise entre ces deux points après que la charge a été enlevée.

d et d_1, diamètres extérieur et intérieur d'un cylindre à base circulaire.

c_1 et c_2, demi-axes de la base d'un cylindre elliptique.

a et b, a_1 et b_1, demi-côtés extérieurs et intérieurs d'un prisme rectangulaire.

s et s_1, aires des sections de la paroi et de la cavité intérieure d'une pièce creuse.

e, épaisseur de la paroi; u, capacité intérieure d'une pièce creuse.

Digitized by Google

p, somme des deux poids appliqués au bout des bras de levier de $247^{mm},5$ de longueur et constituant un couple.

P, poids directement appliqué pour produire l'allongement.

θ, angle de la torsion permanente.

ψ_1, angle de la torsion temporaire. (La valeur moyenne de $\frac{\psi_1}{p}$ a été obtenue en divisant la somme des ψ_1 par la somme des p.)

ψ, angle moyen de la torsion temporaire pour $p = 1$ kilogramme et $l = 1$ mètre.

Δ_1 L et Δ L, allongements élastiques moyens pour une charge effective de 1 kilogramme, et pour une charge de 1 kilogramme par millimètre carré.

A, même allongement pour une charge de 1 kilogramme par millimètre carré, et pour une longueur de 1 mètre.

E, coefficient d'élasticité d'après l'allongement.

ω, ascension du niveau dans le tube capillaire au moment de la torsion.

Ω, abaissement du même niveau au moment de l'allongement.

∂u, diminution moyenne de la capacité intérieure d'une pièce creuse pour $p = 1$ kilogramme.

$\Delta_1 u$ et Δu, augmentation moyenne de cette capacité par suite des allongements Δ_1 L et Δ L.

Toutes les dimensions sont exprimées en millimètres, et les poids en kilogrammes.

Calibrage des tubes capillaires gradués.

NUMÉRO.	CAPACITÉ DE 1 DIVISION.	NUMÉRO.	CAPACITÉ DE 1 DIVISION.
1	0,00353	6	0,01685
2	0,00403	7	0,03452
3	0,00418	8	0,08808
4	0,00596	9	0,09150
5	0,01084	10	0,18357

Digitized by Google

N° 1. — [illegible] en fer d : 16^{mm},440.

	161. 1.			291.5.			l : 433,5.		
p	t	α	$\frac{\alpha}{p}$	θ	α_1	$\frac{\alpha_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
5	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0. 1.10	0.36. 0	0. 7.12
10	0 3 [illegible]	2 57 [illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0. 4.20	1.17.30	0. 7.45
15	0 11 [illegible]	4 28 [illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0. 7. 0	1.57.20	0. 7.49
20	0 22 40	6 0 [illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0.15. 0	2.36.40	0. 7.50
25	0.38 0	7 29 [illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0.33.40	3.16.20	0. 7.51
30	1.21 40	8.59.30	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0.45. 0	3.57.40	0. 7.55
35	4. 8. 0	10.33.40	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	1.21.20	4.33.20	0. 7.49
40	8.35.50	12. 7.30	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	2. 4.20	5.11.50	0. 7.48
180		54. 5.20	0.18.17,8		32.56 10	0. 10.58,7		23.26.40	0. 7.48,8
	Pour 1 mètre.....		0.17.44,8			0.17.50,2			0.18. 1,4

Moyenne... $\psi = 0° 17' 52'',1.$

N° 2. — Cylindre en fer d : 11,002.

	l : 1086,0.			l : 549,8.			l : 543,0.		
1	0. 0. 0	1.30. 0	1.30. 0	0. 0. 0	0.46. 0	0.46. 0	0. 0. 0	0.45.20	0.45.20
2	"	3. 6. 0	1.33. 0	"	1.32.50	0.46.25	"	1.34. 0	0.47. 0
3	0. 5.20	4.35. 0	1.31.40	"	2.22.20	0.47.27	0. 3. 0	2.22.10	0.47.23
4	0. 7.20	6.11. 0	1.32.45	0. 0.40	3. 6 50	0.46.42	0. 1.10	3. 8 30	0.47. 8
5	"	7.50.40	1.34. 8	0. 5.50	3.55.30	0.47. 6	0.10. 0	3.52.50	0.46.34
6	"	9.20.40	1.33.27	0. 8.40	4.43.40	0.47.17	0.11.30	4.37.30	0 46.15
7	0.12.30	11. 4.10	1.34.53	0.11. 0	5.29.20	0.47. 3	0.19.20	5.28.20	0.46.54
8	0.18. 0	12.41.10	1.35. 9	0.14.20	6.16.10	0.47. 1	0.20. 0	6.14.20	0.46.47
9	0.33.30	14 10.30	1.34.30	0.24.10	7. 7.30	0.47.30	0.20.50	7. 9. 0	0.47.40
10	1 40.40	15 51 50	1.35.11	0.30.30	7.54.40	0.47.28	0.33.10	7.51.50	0.47.11
11		86.21. 0	1.31.12,0		43.14.50	0.47.10,7		43. 3.50	0.46.58,7
		»	1.26.44,4			1.25.48,6			1.26.31,0

Moyenne... $\psi = 1° 26' 31'',3.$

Digitized by Google

N° 3. — Cylindre en acier fondu anglais. d : 10,110.

	l : 1000,0.			l : 500,0.			l : 250,0.		
p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
1	0. 0. 0	1.50.30	1.50.30	0. 0. 0	0.54 30	0.54.30	0. 0. 0	0.28. 0	0.28. 0
2	"	3.43.20	1.51.40	"	1.56.40	0.58.20	"	0.58.20	0.29.10
3	"	5.30.10	1.50. 3	"	2.52. 0	0.57.20	"	1.25.40	0.28.33
4	0. 2.30	7.23.40	1.50.55	0. 1. 0	3.46.10	0.55. 2	"	1.52.50	0.28.12
5	"	9.20.50	1.52.10	0. 1.40	4.40.20	0.56 4	0. 3.50	2.20.50	0.28.10
6	0. 6.10	11.10.10	1.51.42	0. 6.20	5.35.30	0.55.55	0. 8.10	2.50. 0	0.28.20
7	0. 9.40	12.50.30	1.50. 4	0. 7.10	6.30.20	0.55.46	"	3.11.10	0.27.19
8	"	14.24.30	1.48. 4	0.14.10	7.29.40	0.56.12	0.13. 0	3.48.20	0.28.33
9	0.19. 10	16.22 40	1.49.11	0 20. 0	8.19.50	0.55.32	0.20.20	4.15.50	0 28.25
10	0.22.30	18.21.10	1.50. 7	0.28.30	9.19.30	0.55.57	0.38.40	4.35.10	0.27.31
12	0.54. 0	21.55.50	1.49.39	0.34.50	10.54.50	0.54.34	0.40.20	5.34.50	0.27.54
14	1.19. 0	25.30. 0	1.49 17	0.54.30	12 54.20	0.55.19	0.48.50	6.30. 0	0.27.51
16	1.36.20	28.53.40	1.48.21	1.13. 0	14.56.10	0.56. 0	0.55. 0	7.30.50	0.28.10
18	2. 7.30	33. 4.20	1.50.14	1.30.10	16.48.50	0.56. 3	1.10.20	8.24.20	0.28. 1
20	3. 3.20	36.25.50	1.49.17	2. 1.30	18.48.10	0.56.24	1.32.50	9.23. 0	0.28. 9
135		246.47.10	1.49.40,9		125,40.50	0.55.51,5		63. 9.10	0.28. 4,1
	Pour 1 mètre....		1.49.40,9			1.51.43,0			1.52.16,4

Moyenne... $\psi = 1^\circ\ 51'\ 13'',4$.

N° 4. — Cylindre en cuivre jaune. d : 10,062.

1	0. 0. 0	3.46.40	3.46.40	0. 0. 0	1.52.50	1.52.50	0. 0. 0	0.58.50	0.58.50
2	"	7.23.10	3.41.35	"	3.48.20	1.54.10	"	1.57.20	0.58.40
3	"	10.53.10	3.37.43	"	5.46.50	1.55.37	"	2.55.30	0.58.30
4	0. 6.50	14.57.30	3.44.22	0. 5.20	7.36.20	1.54. 5	"	3.57.20	0.59.20
5	0.21 20	18.59.10	3.47.50	0.16.10	9.40.20	1.56. 4	0. 7.20	4.56.10	0.59.14
6	0.35 10	22.40. 0	3.46.40	0.24.30	11.22.10	1.53.42	0.11.30	5.58.30	0.59.45
7	0.56.50	26.36.30	3.48. 4	"	13.21.50	1.54.33	0.17.20	7. 0. 0	1. 0. 0
8	1.29.40	30.55.10	3.51.54	0.30. 0	15 22 30	1.55.19	0.18.10	7.58.20	0.59.48
9	2.20.10	35.16. 0	3.55. 7	0.36.30	17.30.50	1.56.45	0.19.50	8.55.50	0.59.32
10	3. 0 0	38.46. 0	3.52.36	0.39.10	19.25.20	1.56.32	0.24.10	9.56.50	0.59.41
11	3.41.30	42.13.40	3.50.20	0.50. 0	21.21.30	1.56.30	0.35. 0	10.55.20	0.59.36
12	4 20.10	46.39.30	3.53.17	1.23.50	23.30.10	1.57.31	0.40.30	11.53.10	0.59.26
13	5.50.20	50.37. 0	3.53.35	1.44.20	25.32.40	1.57.53	0.56.20	12.54.20	0.59.34
14	7.22.20	53.49.40	3.50.11	2. 0. 0	27.35.30	1.58.15	1.21. 0	13.50.40	0.59.20
15	10 27.50	58.27.40	3.53.51	4.41.10	29.36.20	1.58.25	2. 8.30	14.48.50	0.59.15
120		462. 0.50	3.51. 0,4		233.23.30	1.56.41,8		118.57. 0	0.59.28,5
	Pour 1 mètre....		3 51. 0,4			3.53.23,6			3.57.54,0

Moyenne... $\psi = 3^\circ\ 54'\ 6'',0$.

Digitized by Google

N° 5. — Cylindre en verre ordinaire. $d : 7,870$.

l	φ	α	$\frac{\alpha}{p}$
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]		[illegible]	[illegible]

Moyenne... $\varphi = 24'\,15\,34'',7$.

N° 6. — Cylindre en verre ordinaire. $d : 6,845$.

0,2	[illegible]	4.22.20	21.50.50
0,3	[illegible]	7.14.30	24. 7.47
0,5	[illegible]	10. 5. 0	20.10. 0
[illegible]	[illegible]	10.14.30	20.29. 0
0,7	[illegible]	15. 4. 0	21.31.26
2,2		47. 0. 0	21.21.49,1

Moyenne... $\varphi = 28°\,30'\,14'',0$.

Cylindres en cuivre jaune.

N° 7. d : 11,204; $d_1 = 4,933$. l : 892,0.				N° 8. d : 9,121; $d_1 = 4,956$. l : 891,7.				N° 9. d : 7,391; $d_1 = 4,942$. l : 473,7.			
p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″		° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″		° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
1	0. 0. 0	2.17.40	2.17.40	0,5	0. 1.10	2.38.40	5.17.20	0,5	0. 0. 0	3.47.40	7.35.20
2	"	4.26.10	2.13. 5	1,0	"	5.26.40	5.26.40	1,0	"	7.19.50	7.19.50
3	0. 1.30	6.45. 0	2.15. 0	1,5	0. 7.40	8. 0.40	5.20.26	1,5	"	10.54.30	7.16.20
"	0.10.40	6.47.40	2.15.53	2,0	0.10.20	10.47.20	5.23.40	2,0		15. 3.40	7.31.50
4	0.24.10	9. 0.10	2.15. 2	2,5	0.15. 0	13.19.20	5.19.44	2,5	0.38.40	18.42.40	7.29. 4
"	0.26.10	9. 3.20	2.15.55	3,0	0.16.40	16.18.50	5.26.17	3,0	3.30.30	22.34.50	7.31.37
5	0.50.20	11.26. 0	2.17.12	3,5	0.19. 0	18.46.30	5.21.52	3,5	4.51.10	26.11.30	7.29. 0
"	1. 3.10	11.26.40	2.17.20	4,0	0.43.40	21.24.40	5.21.10	4,0	7. 0.50	29.54.40	7.28.40
6	2.29.30	13.44.40	2.17.27	4,5	1.41 30	23.55.30	5.19. 0	4,5	11.12.20	33.59.30	7.33.13
"	4.24.20	13.53.30	2.18.55	5,0	3.34.10	26.40.50	5.20.10	5,0	14.28.30	36.56.20	7.23.16
7	9. 6.50	16. 1.10	2.17.19	5,5	10. 4.30	29.15 20	5 19. 9	5,5	23.47. 0	40.10. 0	7.18.11
8	15.18.30	18.28.20	2.18.33	6,0	26.15. 0	32.36.20	5.26. 3	6,0	38.57. 0	"	"
54		123.20.20	2.17. 2,6	39,0		209 10.40	5.21.48,7	33,0		245.35.10	7.26.31,2
Moyenne... $\psi = 2° 33' 38'',2.$				$\psi = 6° 0' 53'',8.$				$\psi = 15° 42' 37'',3.$			

*) Ces quatre cylindres n'ont pas pu servir à la détermination du changement de volume qui accompagne la torsion, parce qu'étant munis bouchons à vis ils donnaient des résultats différents selon que la torsion avait lieu dans un sens ou dans l'autre.

Digitized by Google

N° 10. — Cylindre creux en fer. d : 13,535 ; d_1 : 11,665.

l : 875,7.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
1,0	0. 0. 0	1.12.30	1.12.30
2,0	0. 7.50	2.27. 0	1.13.30
3,0	0.14.10	3.40.20	1.13.27
5,0	0.12. 0	6. 8.40	1.13.44
7,0	0.25. 0	8.28. 0	1.12.34
8,0	0.30.50	9.29.10	1.11. 9
10,0	0.39.40	12.16.50	1.13.41
12,5	0.44. 0	15.26.20	1.14. 6
15,0	1. 6 30	18.47.20	1 15. 9
17,5	1.43.20	21.40. 0	1.14.17
81,0		99.36.10	1.13.46,8

Moyenne... $\psi = 1° 24' 15'',2.$

Digitized by Google

Tableau N° III. — CYLINDRES PLEINS A BASE ELLIPTIQUE.

N° 11. — Cylindre en acier fondu. $2c_1 : 14{,}210$; $2c_2 : 7{,}394$.

	l : 1000,00.			l : 498,14.			l : 248,82.		
	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′	° ′ ″	° ′ ″
1	0. 0. 0	2.12.20	2.12.20	0. 0. 0	1. 6.10	1. 6.10	0. 0. 0	0.31.10	0.31.10
2	"	4.30. 0	2.15. 0	"	2.13.20	1. 6.40	"	1. 3.40	0.31.50
4	"	8.39.40	2. 9.55	0. 7.30	4.29. 0	1. 7.15	"	2.12.10	0.33. 2
5	0. 4.10	12.54.10	2. 9. 2	0. 9. 0	6.47.10	1. 7.52	0. 1.50	3.17.10	0.32.52
8	0. 8.30	17. 4.20	2. 8. 3	0.15.40	8.57.10	1. 7. 9	0. 8.10	4.23.10	0.32.54
9	0.22.10	21. 3.40	2. 6.22	0.25.30	11. 7. 0	1. 6.42	0.27.10	5.31.50	0.33.11
2	0.35.20	25.10.20	2. 5.52	0.36.40	12.54.50	1. 4.34	0.31.20	6.38. 0	0.33.10
4	1.17.20	29.15.10	2. 5.22	0.48.10	15. 7.20	1. 4.48	0.40.20	7.50.40	0.33.37
6	1.29.40	33.20.30	2. 5 2	1. 3.40	17.20.20	1. 5. 1	0.53.40	9. 0.30	0.33.47
8	2.12. 0	37.33.40	2. 5.12	2. 7.50	19.32.50	1. 5. 9	1. 9.50	10.14.10	0.34. 7
9	3.14.10	41.50.20	2. 5.31	3. 8. 0	21.41. 0	1. 5. 3	1.38.30	11.24. 0	0.34.20
11		233.34.10	2. 6.15,2		121.16.10	1. 5.33,1		62.24. 0	0.33.34,3
	Pour 1 mètre....		2. 6.15,2			2.11.35,6			2.14.55,4

Moyenne... $\psi = 2° 10' 55'',4$.

N° 12. — Cylindre en acier fondu. $2c_1 : 19{,}800$; $2c_2 : 5{,}015$.

	l : 1014,35.			l : 500,00.			l : 248,82.		
1	0. 0. 0	4. 6.50	4. 6.50	0. 0. 0	2. 3.20	2. 3.20	0. 0. 0	1. 0.50	1. 0.50
2	0. 5.30	8.14.40	4. 7.20	"	4. 9. 0	2. 4.30	"	2. 1.50	1. 0.55
4	0.34. 0	16.28.50	4. 7.12	0. 4. 0	8.21.30	2. 5.22	"	4. 9. 0	1. 2.15
6	0.52.30	24.54. 0	4. 9. 0	0.14. 0	12.41.20	2. 6.53	0. 1.20	6.16.10	1. 2.42
8	1.13.40	33.44.50	4.13. 6	0.17.50	16.50. 0	2. 6.15	0. 4.10	8.19. 0	1. 2.23
10	1.52.10	42.38. 0	4.15.48	0.25.10	21. 0.10	2. 6. 1	0. 6.30	10.30.10	1. 3. 1
12	2.37.30	50.33.20	4.12.47	0.30. 0	25. 9.50	2. 5.49	0.10.50	12.36.50	1. 3. 4
14	3.10. 0	59. 4.10	4.13. 9	1. 1. 0	29.29.30	2. 6.24	0.18.40	14.41.20	1. 2.57
16	4.27.30	68.10. 0	4.15.37	1.16.20	33.59. 0	2. 7.26	0.25.40	16.58.10	1. 3.38
18	5.48.20	76.27.10	4.14.50	1.47.20	38.21. 0	2. 7.50	0.52.10	19.20.30	1. 4.28
20	7.48. 0	86. 2.50	4.18. 8	2.17. 0	42.40.50	2. 8. 2	1.30.40	21.41.10	1. 5.30
111		470.24.40	4.14.16,6		234.45.30	2. 6.53,8		117.35. 0	1. 3.33,5
	Pour 1 mètre....		4.10.40,8			4.13.47,6			4.15.26,5

Moyenne... $\psi = 4° 13' 18'',2$,

Digitized by Google

N° [illegible] — [illegible] ; 2e₁ : 7,338.

[illegible]				[illegible]			l : 251,39.		
									$\frac{\psi_1}{p}$
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0. ?. ?	1. 4.50	1. 4.50
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	″	2. 8.30	1. 4.15
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0. ?. ?	3.16.30	1. 5.30
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0.?.30	4.25.30	1. 6.22
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0.?.30	5.36.30	1. 7.18
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0.?. ?	6.45.10	1. 7.31
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0.?.30	7.59.10	1. 8.27
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0.?.?	9.12.50	1. 9. 6
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	1.30.30	10.?. 0	1. 9.20
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	2. ?.20	11.55.10	1.11.31
[illegible]		[illegible]	[illegible]		[illegible]	[illegible]		6?.48.10	1. 8.30,?
Pour 1 mètre			[illegible]			[illegible]			4.32.44,?

Moyenne... ψ = [illegible]

N° 14. — Cylindre en cuivre jaune. 2r : 19,75? ; 2e₁ : 4,996.

	l : 1000,0.			l : 500,0.			l : 250,0.		
1	0. 0. 0	8.40.50	8.40.50	0. 0. 0	4.15. 0	4.16. 0	0. 0. 0	2.10.10	2.10.10
2	0. 6.40	17.30.10	8.45. 5	0. 3.10	8.27.40	4.13.50	″	4.21.20	2.10.40
4	0.20.20	35. 4.50	8.46.12	0.15.20	17.27. 0	4.21.45	0. 5.30	8.47.10	2.11.47
6	0.31.20	53.30.40	8.55. 7	0.23.40	26.20. 0	4.23.20	0.12.50	13.23.50	2.13.58
8	1. 4.40	71. 8. 0	8.53.30	0.38.40	35.27.50	4.25.59	0.17.40	17.53.20	2.14.10
10	1.42.10	89.56.10	8.59.37	0.50.20	44.41.50	4.28.11	0.37.30	22.25.50	2.14.35
12	″	″	″	2.11.50	54.15.50	4.31.19	1.40.40	27.10.40	2.15.53
43		275.50.40	8.53.53,6		190.56.10	4.26.25,3		96.12.20	2.14.14,4
Pour 1 mètre....			8.53.53,6			8.52.50,6			8.56.57,6

Moyenne... $\psi = 8^\circ\,54'\,33'',9$.

Digitized by Google

Tableau N° IV. — PRISMES A BASE RECTANGULAIRE.

Prismes de fer.

15. $2a$: 24,825,2; b : 24,825.

l : 1000.

	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
5	0. 0. 0	0.10.20	0.2. 4
0	"	0.20.40	0.2. 4
5	"	0.31.20	0.2. 5
0	0. 1. 0	0.43.10	0.2. 9
5	0. 5.30	0.53.30	0.2. 8
0	0. 6.50	1. 3.20	0.2. 7
5	0. 7.30	1.14.10	0.2. 7
0	0.10.30	1.26.20	0.2. 9
5	0.11.20	1.36.30	0.2. 9
0	0.12.10	1.48. 0	0.2.10
5	0.13.50	1.59.10	0.2 10
0	0.14.20	2. 9.50	0.2.10
90		13.56.20	0.2. 8,7

Moy. $\psi = 0°2'8'',7$.

N° 16. $2a$: 19,754; $2b$: 19,754.

l : 1000.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
5	0. 0. 0	0.26.20	0.5.16
10	"	0.51.40	0.5.10
15	0. 0.50	1.18.10	0.5.13
20	0. 1.20	1.44. 0	0.5.12
25	0. 1.30	2. 9.30	0.5.11
30	"	2.35.40	0.5.11
35	0. 3. 0	3. 2.40	0.5.12
40	0. 5.30	3.29.20	0.5.14
45	0. 6.20	3.56.30	0.5.15
50	0. 9.10	4.24.30	0.5.17
"	"	"	"
"	"	"	"
275		23.58.20	0.5.13,8
	Pour 1 mètre...		0.5.13,8

l : 250.

θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
0. 0. 0	0. 6.30	0.1.18
"	0.13.30	0.1.21
0. 0.10	0.18.50	0.1.15
0. 1.30	0.27. 0	0.1.21
0. 4. 0	0.34.30	0.1.23
0. 5.30	0.40.10	0.1.20
0.12.20	0.44.10	0.1.16
0.13.10	0.52.50	0.1.19
"	0.58.30	0.1.18
0.16.10	1. 8.50	0.1.23
"	"	"
"	"	"
	6. 4.50	0.1.19,6
		0.5.18,4

Moyenne... $\psi = 0°5'16'',1$.

N° 17. $2a$: 15,065; $2b$: 14.970.

l : 1000.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
5	0. 0. 0	1.18.50	0.15.46
10	0. 1.40	2.38.30	0.15.51
15	0. 4.10	3.58.20	0.15.53
20	0. 7.30	5.18.50	0.15.56
25	0.10.40	6.35.10	0.15.48
30	0.17.30	7.54.10	0.15.48
35	0.19.10	9.16.40	0.15.54
40	0.24. 0	10.37.30	0.15.56
45	0.26.30	11.57. 0	0.15.56
50	0.38. 0	13.18.20	0.15.58
275		72.53.20	0.15.54,2

Moy. $\psi = 0°15'54'',2$.

N° 18. $2a$: 23,980; $2b$: 15,826.

l : 1000.

θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
0. 0. 0	0.30.40	0.6. 8
0. 0.30	1. 0.50	0.6. 5
0. 4. 0	1.31.50	0.6. 7
0. 6. 0	2. 2.30	0.6. 7
0. 8.30	2.31.40	0.6. 4
0.11. 0	3. 3. 0	0.6. 6
0.14.50	3.35.20	0.6. 9
0.18.50	4. 7.30	0.6.11
0.21. 0	4.40.10	0.6.13
0.24.20	5.13.20	0.6.16
	28.17.10	0.6.10,3

Moy. $\psi = 0°6'10'',3$.

N° 19. a : 23,830; $2c$: 11,964.

l : 1000.

θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
0. 0. 0	0.59. 0	0.11.48
0. 2.30	1.59.10	0.11.55
0. 4.10	2.59.20	0.11.57
0. 5. 0	3.59.30	0.11.59
0. 9.30	5. 0.50	0.12. 2
0.12.10	6. 2.20	0.12. 4
0.14.20	7. 2.40	0.12. 4
0.17.30	8. 6.30	0.12.10
0.20.30	9. 5.20	0.12. 7
0.25. 0	10. 9.30	0.12.11
	55.24.10	0.12. 5,3

Moy. $\psi = 0°12'5'',3$.

Digitized by Google

N° 20. $2a$: 24,120 ; $2b$: 7,972.

l : 1000.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
2	0. 0. 0	1. 7.40	0.33.50
4	0. 1.20	2.12. 0	0.33. 0
6	0. 4.50	3.15.30	0.32.35
8	0. 6.30	4.27. 0	0.33.23
10	0. 8.30	5.28.10	0.32.49
12	0.11.50	6.34.30	0.32.53
14	"	7.39.50	0.32.51
16	0.14.20	8.51.50	0.33.14
18	0.15. 0	9.57.50	0.33.13
20	0.16.20	11. 4.50	0.33.14
22	"	12. 8. 0	0.33. 5
24	0.20.50	13.23.30	0.33.29
26	"	14.32.30	0.33.33
28	0.22.20	15.41.10	0.33.37
30	0.24.40	16.51.30	0.33.43
32	0.26.30	18. 0. 0	0.33.45
272		151.15.50	0 33.22,0

Moyenne. . $\psi = 0° 33' 22'',0.$

N° 21. $2a$: 23,880 ; $2b$: 5,964.

l : 1000.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
2	0. 0. 0	2.31.40	1.15.50
4	0. 5.50	5.11.20	1.17.50
6	0.15. 0	7.32.10	1.15.22
8	0.24.30	9.57.30	1 14 41
10	0.30.50	12.30.20	1.15. 2
12	0.35.40	14.48.50	1.14. 4
14	0.39.20	17.33.50	1.15.16
16	0.45.40	20.18.50	1.16.11
18	0.48. 0	22.58.10	1.16.34
20	0.51.10	25.37.20	1.16.52
22	1. 4.30	28.12. 0	1.16.54
24	1. 0.20	30.43.40	1.16.49
26	1.13.10	33.27.10	1.17.12
28	1.24.30	36.13.20	1.17.37
30	1.38.50	38.54.10	1.17.48
240		306.30.20	1.16.37,3

Moyenne... $\psi = 1° 16' 37'',3.$

N° 22. $2a$: 23,800 ; $2b$: 4,842.

l : 1000.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
2	0. 6.40	4.44.30	2.22.15
4	0.15. 0	9.26.20	2 21.35
6	0.29.30	14. 0.10	2.20. 2
8	0.38.10	18.45.20	2.20.40
10	0.41. 0	23.24 0	2.20.24
12	0.52.40	28. 8.40	2.20.43
14	"	32.37.10	2.19.48
16	1. 3.50	37.38. 0	2.21. 7
18	1.10. 0	42.16.10	2.20.54
20	1.49.30	46.45.30	2.20.16
110		257.45.50	

Moyenne... $\psi = 2° 20'$ 3

Digitized by Google

N° 23. — $2a$: 23,900 ; $2b$: 3,936.

	l : 1000.			l : 500.		
p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
1	0.50. 0	3.47.20	3.47.20	0.10.20	1.51.20	1.51.20
2	1.40 50	7.39 10	3.49.35	0.25 10	3.57.10	1.58.35
3	2.11.10	11.29.50	3.49.57	1. 2.30	5.58.30	1.59.30
4	2.20. 0	15.46.30	3.56.37	1.10.50	7.56.20	1.59. 5
5	2.32.10	19.58.50	3.59.46	1.16.20	9.53 40	1.58.44
6	2.55. 0	24.40.30	4. 6.45	1.20. 0	12.13.20	2. 2.13
7	3.16.40	29.48.10	4.15.27	1.36.10	14.43.50	2. 6.16
8	3.43.50	33.46.10	4.13.16	2.19. 0	16.53.50	2. 6.44
9	4. 0. 0	38.10. 0	4.14.27	2.20.40	19.17.50	2. 8.39
10	4.20. 0	42. 6.10	4.12.37	2.40. 0	21.26.20	2. 8.38
11	5. 5.30	45.57.40	4.10.42	2.57. 0	23 53. 0	2.10.16
12	5.31. 0	50.29. 0	4.12.25	3.11 40	26. 1.30	2.10. 7
78		323.39.20	4. 8.57,9		164. 6.40	2. 6.14,4
	Pour 1 mètre.....		4. 8.57,9			4.12.28,8

Moyenne... $\psi = 4^\circ\,10'\,43'',3$.

N° 24. — $2a$: 23,920; $2b$: 2,900.

	l : 500.			l : 250.		
1	0. 7.10	4.54.40	4.54.40	0. 0. 0	2.28. 0	2.28. 0
2	0 40. 0	9.58.30	4.59.15	0.16.10	5. 5.30	2.32.45
3	1. 9. 0	15.12.40	5. 4.13	0.28.30	7.40.40	2.33.33
4	1.24.50	20.52. 0	5.13. 0	1. 3.40	10.40. 0	2.40. 0
5	1.54.20	27. 4.20	5.24.52	1.24.10	13.23.30	2.40.42
6	2.11.30	32.48. 0	5.28. 0	"	16.23. 0	2.43.50
7	3. 2.30	38.53.40	5.33.23	1.49.40	19.17.50	2.45.24
8	4.22.20	44.40.20	5.35. 2	1.55.10	22.23.40	2.47.57
9	6.10. 0	50.30. 0	5.36. 7	2.51.50	25.23 10	2.49.14
10	7.39.30	56. 5.20	5.36.32	5.18. 0	28.19.50	2.49.59
55		300.59.30	5.28.21,5		151. 5.10	2.44.49,3
	Pour 1 mètre.....		10.56.43,0			10.59.17,2

Moyenne... $\psi = 10^\circ\,58'\,0'',1$.

Digitized by Google

N° 25. — $2a$: 23,950; $2b$: 2,083.

	l : 500.			l : 250.		
p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
1.0	0.10.20	14. 5.10	14. 5.10	0. 0. 0	7.11.40	7.11.40
1.5	0.45. 0	22.23.20	14.55.34	0.42.10	11.10.30	7.27. 0
2.0	1.32.30	28.58.40	14.29.20	1.30.20	14.30.30	7.15.15
2.5	1.51.20	37.43.30	15. 5.24	2.24.10	19. 3.50	7.37.32
3.0	2.21. 0	44.56.40	14.58.53	3. 8.50	22.31. 0	7.30.20
3.5	3.34.20	52.40. 0	15. 2.52	6.20.50	26.55.10	7.41.28
4.0	7.44.30	59.50.10	14.57.32	9.41.20	30. 4.30	7.31. 7
4.5	13.33.20	64.30. 0	14.20. 0	15.43.20	33.59.20	7.33.11
5.0	19.38.10	75.22.20	15. 4 28	20.18.50	38.21.50	7.40.22
27.0		400.29.50	14.49.59,6		203.48.20	7.32.54,1
	Pour 1 mètre		29.39.59,2			30.11.36,4

Moyenne... $\psi = 29^\circ\ 55'\ 47'',8$.

N° 26. — $2a$: 23,880; $2b$: 1,036.

	l : 250.			l : 125.		
0.2	0. 0. 0	11.14.50	56.14.10	0. 0. 0	6. 2.40	30.13.20
0.3	"	17.17.40	57.38.53	"	8.40.20	28.54.27
0.5	1.38.40	27.37.50	55.15.40	0.37.10	14. 3.10	28. 6.20
0.7	2. 5.10	39.17.20	56. 7.40	0.57.10	19.43.40	28.10.57
0.8	2.38.20	43.31.50	54.24.50	1.41.10	21.33.50	26.57.18
1.0	3.58.30	55. 4.30	55. 4.30	2.37.30	25.54.50	25.54.50
1.2	4.51.50	66. 2.20	55. 1.58	2.55.20	30.29.30	25.24.35
1.3	5.21. 0	71.11. 0	54.45.23	3. 0.30	34.51.30	26.48 51
1.5	8.38.40	76. 0. 0	50.40. 0	12. 8. 0	37.40.20	25. 6.53
7.5		407.17.20	54.18.18,6		198.59.50	26.31.58,6
	Pour 1 mètre.....		217.13.14,4			212.15 48,8

Moyenne... $\psi = 214^\circ\ 44'\ 31'',6$.

Digitized by Google

N° 27. — $2a$: 10,677; $2b$: 10,620.

	l : 1000.			l : 500.		
p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
.1	0. 0. 0	0.59.10	0.59.10	0. 0. 0	0.31.10	0.31.10
2	0. 1.20	2. 5.50	1. 2.55	"	1. 5.30	0.32.45
3	0. 3.10	3. 5.40	1. 1.53	0. 8.10	1.35.40	0.31.53
4	0. 7.50	4. 6.10	1. 1.32	0 13.50	2. 7. 0	0.31.45
5	0.11.10	5.12.30	1. 2.30	0.14.10	2.37.30	0.31.30
6	0.15. 0	6.15.10	1. 2.32	0.14.50	3. 8.50	0.31.28
7	0.23.50	7.18. 0	1. 2.34	0.18.10	3.37.20	0.31. 3
8	0.31.20	8.19.20	1. 2.25	0.21.20	4. 8.20	0.31. 3
9	0.45.20	9.18.10	1. 2. 1	0.22.20	4 41. 0	0.31.13
10	0.50. 0	10.24.10	1. 2.25	0.24.20	5.11.30	0.31. 9
11	1. 9. 0	11.22.20	1. 2. 2	0.27. 0	5.42.50	0.31.10
12	1.23.50	12.25.30	1. 2. 7	0.30.20	6.12.50	0.31, 4
13	1.36.10	13.29.30	1. 2.16	0.34.10	6.44.30	0.31. 7
14	1.50.20	14.25.40	1. 1.50	0.38. 0	7.18.20	0.31.18
15	2.48.40	15.35.10	1. 2.21	0.42. 0	7.52.30	0.31.30
16	3.27.50	16.34.20	1. 2. 9	0.48.50	8.23.50	0.31.30
17	4.57.50	17.28.20	1. 1.40	0.55.10	8.56.40	0.31.34
18	7.50. 0	18.43.40	1. 2.26	1.10.20	9.25.50	0.31.26
19	10.48.20	19.32. 0	1. 1 41	2.34.50	10. 0. 0	0.31.34
20	18. 5.40	20.29.50	1. 1.29	5.12.10	10.31.10	0.31.33
210		217.10.30	1. 2.30,0		109.52 20	0.31.23,5
	Pour 1 mètre.....		1. 2.30,0			1. 2.47,0

Moyenne... $\psi = 1^\circ 2' 38'',5$.

N° 28. — $2a$: 5,004; $2b$: 4,997.

	l : 520,3.			l : 250.		
0.5	0. 0. 0	5.19. 0	10.38. 0	0. 0. 0	2.34.50	5. 9.40
1.0	0. 2.20	10.50.20	10.50.20	0. 6.10	5.24.10	5.24.10
1.5	0.42.30	15.56. 0	10.37.20	0. 9. 0	8. 1. 0	5.20.40
2.0	1.39. 0	21.42.40	10.51.20	0.34.30	10.24.40	5.12.20
2.5	2.50.20	26.58.40	10.47.28	1. 5. 0	13. 0.20	5.12. 8
3.0	7.40.50	32.52.10	10.57,23	1.53.40	16.13.40	5.24.33
3.5	17. 0. 0	37.23. 0	10.40.52	4.53.40	17.59.10	5. 8.20
14.0		151. 1.50	10.47.16,4		73.37.50	5.15.33,6
	Pour 1 mètre.....		20.44. 2,3			21. 2.14,4

Moyenne... $\psi = 20^\circ 53' 8'',3$.

Digitized by Google

N° 29. — Prisme de fer. $2a$: 14,960; $2b$: 3,192.

l : 1030,8.				l : 500.			
p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″		° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
0.5	0. 0. 0	7.22.10	14.44.20	0.5	0. 0. 0	3.37.30	7 15. 0
1.0	0. 3.10	14.58.10	14.58.10	1.0	"	7.12.50	7.12.50
1.5	"	22.20. 0	14.53.20	1.5	"	10.58.50	7.15.54
2.0	"	29.59.20	14.59.40	2.0	0. 2.20	14.21.30	7.10.45
2.5	0.22.20	37.21.20	14.56.32	2.5	0.11.10	18. 1. 0	7.12.24
3.0	"	45. 6. 0	15. 2. 0	3.0	0.25. 0	21.33.20	7.11. 7
3.5	0.36. 0	52.30. 0	15. 0. 0	3.5	0.40.30	25.12.30	7.12. 9
4.0	0.44.20	60.34.30	15. 8.37	4.0	0.57.30	28.51.30	7.12.52
4.0	0.53.10	61. 6.50	15.16 42	5.0	2.20.40	36.28.30	7.17.42
				6.0	5.16.30	44. 7.30	7.21.15
22.0		331.18.20	15. 3.33,6	29.0		210.25. 0	7.15.20,7
	Pour 1 mètre.....		14.36.32,4				14.30.41,4

Moyenne... $\psi = 14° 33' 36'',9$.

N° 30. — Bande de tôle. $2a$: 12,200; $2b$: 3,399 (*).

l : 1011,9.				l : 496,8.			l : 250,0.		
p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
0.5	0.12. 0	8.20.30	16.41. 0	0. 0. 0	4. 4.40	8. 9.20	0. 0. 0	2. 3.30	4. 7. 0
1.0	2.14.50	16.52.30	16.52.30	1. 2.10	8.30. 0	8.30. 0	0.44.50	4. 4.10	4. 4.10
1.5	4. 0. 0	24.53.10	16.35.26	2.22.50	12.22.40	8.15. 6	1.10.40	6.10.50	4. 7.13
2.0	6.36.50	32.41.10	16.20.35	4.10.20	16.19.50	8. 9.55	2.10.10	8.10.50	4. 5.25
2.5	9.33. 0	40.47.50	16.19. 8	8.33.50	21. 0. 0	8.24. 0	4. 0. 0	10.23.10	4. 9.16
3.0	11.10. 0	49.11.10	16.23.43	13. 0. 0	23.53. 0	7.57.40	6.39.30	12.10.30	4. 3.30
3.5	15. 0. 0	55.33. 0	15.52.17	21. 2.50	28.33.20	8. 9.32	11.20.40	14. 9.20	4. 2.40
4.0	31. 8.30	64.10. 0	16. 2.30	27.30. 0	32.43.20	8.10.50	17.28. 0	16.22. 0	4. 5.30
18.0		292.29.20	16.14.57,8		147.26.50	8.11.29,1		73.34.20	4. 5.14,4
	Pour 1 mètre....		16. 3.29,9			16.29.18,5			16.20.57,6

Moyenne... $\psi = 16° 17' 55'',3$.

(*) En moyenne; l'épaisseur varie d'une manière assez notable dans toute la longueur de la bande.

Digitized by Google

Prismes en acier fondu. — N° 31. $2a : 6{,}005$; $2b : 6{,}001$.

	l : 1012,62.			l : 499,81.			l : 249,38.		
p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
1	0. 0. 0	10. 9.30	10. 9.30	0. 0. 0	4.58.40	4.58.40	0. 0. 0	2.30.10	2.30.10
2	*n*	20,29.16	10.14.38	*n*	10. 2.40	5. 1.20	*n*	5. 5.50	2.32.55
3	0.12.30	31. 5.30	10.21.50	0. 2.30	15. 9 30	5. 3.10	*n*	7.35.10	2.31.43
4	0.33.20	41. 3.10	10.15.48	0. 5.50	20. 5. 0	5. 1.15	0. 4.40	10. 9.10	2.32.18
5	0.40. 0	51.44.20	10.20.52	0.10.10	25.30.20	5. 6. 4	0.25.20	12.37.20	2.31.28
6	1.53.40	62. 4.30	10.20.45	0.28.20	30.27.10	5. 4.32	0.26.30	15.13.10	2.32.12
7	2.55.20	72.24.10	10.20.36	0.45.10	35.36. 0	5. 5. 9	0.30. 0	17.44.40	2.32. 6
8	6.10. 0	82.45.40	10.20.42	1.29.30	41. 2.10	5. 7.46	0.48.30	20 22.40	2.32.50
9	13.59.50	93.20.10	10.22.14	2. 1.40	45.45. 0	5. 5. 0	1. 5.20	23. 7.40	2.34.11
10	24.39.10	103. 0. 0	10.18. 0	4.13.20	51.12.10	5. 7.13	3.37.40	25.31.10	2.33. 7
55		568. 6.10	10.19.44,9		279.48.40	5. 5.14,9		139 57. 0	2.32.40,4
	Pour 1 mètre...		10.12. 1,4			10.10.43,8			10.12.12,7

Moyenne... $\psi = 10° 11' 39'',3$.

N° 32. — $2a : 9{,}030$; $2b : 4{,}028$.

	l : 1000,0.			l : 500,0.			l : 250,0.		
1	0. 5.10	12. 8.40	12. 8.40	0 23. 0	6.10.10	6.10.10	0. 7.10	2.54.10	2.54.10
2	1.10. 0	24.43.30	12.21.45	0.40.30	12.31. 0	6.15.30	0.12.10	6.16.20	3. 8.10
3	2.32.40	37. 6.30	12.22.10	1. 2. 0	18.40. 0	6.13.20	0.16. 0	9.38.20	3.12.47
4	4. 0. 0	50.18.20	12.34.35	1.23.20	25. 9.10	6.17.17	0.17.30	12.58. 0	3.14.30
5	6.20.20	61.30. 0	12.18. 0	1.44.10	31.17.40	6.15.32	0.26. 0	16 12.10	3.14.26
6	8.22.40	74.34.20	12.25.43	1.58.50	37.45.20	6.17.33	0.47.10	19. 7.40	3.11.17
7	10.13.10	86.31. 0	12.21.34	3. 0. 0	43.59.20	6.17. 3	1.36.40	22.23.30	3.11.56
8	16.56.50	99.33.50	12.26.44	7.13.30	50. 7.30	6.15.56	5,22.50	24.57.10	3. 7. 9
9	28.56.10	113.16.30	12.35.10	17. 5.10	57.25.30	6.22.50	13.47.10	28.12.10	3. 8. 1
10	35.35. 0	126. 0.50	12.36. 5	31. 7. 0	62.44. 0	6,16.24	23.25. 0	30.52.10	3. 5.13
55		685.43.30	12.28. 9,3		345.49 40	6.17.16,0		173.31.40	3. 9.18,2
	Pour 1 mètre...		12.28. 9,3			12.34.32,0			12.37.12,8

Moyenne... $\psi = 12° 33' 27'',7$.

Digitized by Google

N° 33. — $2a$: 12,034; $2b$: 3,033.

l : 990,0.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
0.3	0. 0. 0	5.57. 0	19.50. 0
0.7	0.10. 0	13.24.10	19. 8.50
0.8	″	15.21.40	19.12. 5
1.0	0.32.10	20. 0.20	20. 0.20
1.2	″	23.23.30	19.29.35
1.5	1. 7.50	30.11.20	20. 7.54
2.0	1.19.40	39.17.50	19.38.40
2.5	2. 0. 0	49. 0.40	19.36.16
3.0	2. 8.30	57.48. 0	19.16. 0
13.0		254.24.30	19.34.11,5
	Pour 1 mètre.....		19.46. 3,1

l : 498,8.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
0.5	0. 0. 0	4.37.50	9.15.40
1.0	″	9.22.20	9.22. 2
1.5	″	14.25.50	9.37.14
2.0	0 7. 0	19. 9.50	9.34.55
2.5	0.23.50	24. 4.40	9.37.52
3.0	0.35.10	29. 0.40	9.40.13
3.5	0.50. 0	33.58.10	9.42.20
4.0	1.13.30	38.57.40	9.44.25
″	″	″	″
18.0		173.37. 0	9.49.47,1
			19.42.24,5

l : 242,5.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
0.5	0. 0. 0	2.22.40	4.45.20
1.0	″	4.48.20	4.48.20
1.5	″	7. 9.10	4.46. 6
2.0	″	9.34.20	4.47.10
2.5	0. 5. 0	11.58.10	4.47.16
3.0	″	14.29.10	4.49.43
3.5	0.14.20	17. 0. 0	4.51.26
4.0	0 28.30	19.24.10	4.51. 2
5.0	0.49.40	24. 0.20	4.48. 4
23.0		110.46.20	4.48.58,3
			19.51.39,6

Moyenne... $\psi = 19° 46' 42'',4$.

N° 34. — $2a$: 18,003; $2b$: 2,104.

l : 816,5.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
0.3	0. 0. 0	8.34.10	28.33.50
0.5	″	15. 8.10	30.16.20
0.7	0.12. 0	21. 2.50	30. 4. 0
0.8	0.20.20	23. 4.30	28.50.40
1.0	0.40. 0	30.47.40	30.47.40
1.2	0.56.30	35.30.10	29.35. 8
1.5	1.24.30	45.34.20	30.22.54
2.0	1.44.20	63.20.50	31.40.25
″	″	″	″
8.0		243. 2.40	30.22.50,0
	Pour 1 mètre.....		37.12.29,7

l : 480,0.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
1.0	0. 0. 0	16.24.20	16.24.20
1.5	0.35.10	24.44.30	16.34.50
2.0	0.45. 0	33.29.40	16.44.50
3.0	1.34.30	50.25.50	16.48.37
3.5	1.49.30	56.41.30	16.11.41
4.0	4.56.20	67.14. 0	16.48.30
5.0	15.12.50	84.22.10	16.52.26
″	″	″	″
″	″	″	″
20.0		333.22. 0	16.40. 6,0
			34.43.33,6

l : 238,0.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
0.5	0. 3.20	4.29.40	8.59.20
0.7	″	6.15.30	8.56.30
0.8	0. 7.50	7. 0. 0	8.45. 0
1.0	0.12.30	8.50.20	8.50.20
1.5	″	13.13.10	8.48.46
2.0	0.17.30	17.20. 0	8.40. 0
2.5	0.38.30	22. 6.20	8.50.32
3.0	0.50.20	26.28.20	8.49.27
4.0	1.11.30	35.55.10	8.58.47
16.0		141.38.30	8.51. 9,4
			37.11.45,6

Moyenne... $\psi = 36° 22' 36'',3$.

Digitized by Google

N° 35. — $2a : 35,994$; $2b : 1,076$.

l : 461,4.				l : 220,0.			
p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
0.5	2. 6'50"	23°51'10"	47°42'20"	0.5	0° 0' 0"	11°39'30"	23°19' 0"
1.0	4. 5.10	50.12.20	50.12.20	0.7	"	14.14. 0	20.20. 0
1.5	10.22.10	74. 5.40	49.23.46	0.8	"	17.30.20	21.52.55
2.0	67.44. 0	90.32. 0	45.16. 0	1.0	0.50. 0	21.12.20	21.12.20
"	"	"	"	1.5	1.32.10	32.47.50	21.51.54
"	"	"	"	2.0	4.35.40	44.10.40	22. 5.20
5.0		238.41.10	47.44.14,0	6.5		141.34.40	21.46.52,0
Pour 1 mètre.....			103.27.44,7				99. 0.19,5

Moyenne... $\psi = 101° 14' 2'',1$.

Digitized by Google

N° 36. — Prisme d'acier Huntsman. $2a$: 27,280; $2b$: 6,029.				N° 37. — Cuivre jaune. $2a$: 3,628; $2b$: 3,566.			
l : 945,75.				l : 317,79.			
p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	
2.0	0. 0. 0	2. 1.50	1. 0.55	0. 0. 0	1. 7.20	0.33.40	
4.0	0. 0.40	4. 4.20	1. 1. 5	"	2.11.40	0.32.55	
6.0	"	6. 8 20	1. 1.23	0. 2. 0	3.23.30	0.33.55	
8.0	"	8. 8. 0	1. 1. 0	"	4.28.30	0.33.34	
10.0	0. 5.40	10.11.30	1. 1. 9	0. 5.50	5.35. 0	0.33.30	
12.5	0. 9.40	12.35. 0	1. 0.24	0. 8.50	6.40.20	0.32. 2	
15.0	0.10.30	15.23.50	1. 1.35	0. 9. 0	8.28.10	0.33.53	
17.5	0.12.20	17.50.40	1. 1.11	0.12.50	9.49.40	0.33.42	
20.0	0.14.30	20.35. 0	1. 1.37	0.15.10	11.17. 0	0.33.51	
22.5	"	23. 0.20	1. 1.21	"	12.32.40	0.33.27	
25.0	0.26. 0	25.39. 0	1. 1.34	0.22.40	14. 5.10	0.33.48	
27.5	0.42.50	28. 2.20	1. 1.11	0.31.30	15.20.50	0.33.29	
30.0	0.57. 0	31. 0 50	1. 2. 2	0.30.40	17. 1.20	0.34. 3	
32.5	1.21.30	33.25.10	1. 1.42	0.34. 0	18.20.40	0.33.52	
35.0	2.21.20	36. 0. 0	1. 1.43	0.37.20	19.44.50	0.33.51	
37.5	4.10. 0	38.46.50	1. 2. 3	0.51.30	21.19.10	0.34. 7	
40.0	6.20.30	41.15.50	1. 1.54	1. 6.30	22.50. 0	0.34.15	
345.0		354. 8.50	1. 1.35,4		194.15.50	0.33.47,1	
	Pour 1 mètre.....		1. 5. 7,4			1. 5.14,9	
	Moyenne... $\psi = 1°\,5'\,11'',1$.						

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
0.2	0. 0. 0	7.39.20	37.46.40
0.4	0. 5. 0	14.43. 0	36.47.30
0.5	0.30.10	20. 4. 0	40. 8. 0
0.6	1.20.20	24.18.30	40.30.50
0.8	6.50.20	31.23.40	39.14.35
1.0	10.41.40	36.25.20	36.25.20
1.0	17.40. 0	35.40.30	35.40.30
1.0	22. 9.20	37.18. 0	37.18. 0
1.0	38.22.10	38.36. 0	38.36. 0
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
6.5		246. 8.20	37.52.3,1
	Pour 1 mètre.....		151.28.12,3
	Moyenne... $\psi = 151°\,28'\,12'',3$.		

Digitized by Google

N° 38. Prisme en cuivre jaune. $2a$: 14,918; $2b$: 4,142.

l : 1021,2.				l : 501,5.			l : 250,0.		
p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
0.5	0. 0. 0	5.54.10	11.48.20	0.33.50	3.18.40	6.37.20	0. 0. 0	1.29.50	2.59.40
1.0	0. 9 40	12.35. 0	12.35. 0	2.14.30	6.26.40	6.26.40	0. 8.30	3. 2. 0	3. 2 0
1.5	1. 3.40	19.28.50	12.59.14	4.30. 0	10. 0. 0	6.40. 0	1.17.30	4.41.20	3. 7.34
2.0	4.26 20	26. 7.30	13. 3.45	5.41. 0	13.12.10	6.36. 5	2. 1. 0	6.34. 0	3.17. 0
2.5	8.15.40	34.57. 0	13.58.48	9.24.40	16.48.40	6.43.28	3.26.40	8.20.40	3.20.16
3.0	17. 1.30	40.52.10	13.37.23	13.41.40	20. 3.40	6.41.13	4.56. 0	10.28.40	3.29.33
3.5	26.51.10	48.18.50	13.48.14	18.27.40	22.55.20	6.32.58	6.55. 0	12. 1.20	3.26. 6
4.0	43.28.10	53.57.30	13.29.23	30.10. 0	27. 8.20	6.47. 5	10.18.20	13.48.30	3.27. 7
18.0		242 11. 0	13.27.10,7		119.53.30	6.39.38,0		60.26.20	3.21.27,8
	Pour 1 mètre.....		13.10.31,2			13.16.52,6			13.25.51,2

Moyenne... $\psi = 13° 17' 45'',0$.

Prismes en flint Guinant.

N° 39. $2a$: 22,851; $2b$: 21,100.

l : 243,0.			
p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
2	0. 0. 0	0. 7.30	0. 3.45
4	"	0.18.10	0. 4.32
6	"	0.24.20	0. 4. 3
8	"	0.32.20	0. 4. 3
10	"	0.42. 0	0. 4.12
12	"	0.50.50	0. 4.14
14	0.13.50	1. 2.50	0. 4.29
16	0.25. 0	1.16.50	0. 4.48
18	0.42.10	1.25.10	0. 4.44
90		6.40. 0	0. 4.26,7

Moyenne. $\psi = 0° 18' 17'',5$.

N° 40. $2a$: 19,800; $2b$: 17,950.

l : 80,5.			
p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
2	0. 0. 0	0. 5.40	0.2.50
4	"	0.12.10	0.3. 2
6	"	0.15. 0	0.2.30
8	"	0.17.50	0.2.14
10	"	0.27.50	0.2.47
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
30		1.18.30	0.2.37,0

Moyenne. $\psi = 0° 32' 29'',9$.

Digitized by Google

Prismes en cristal de Baccarat.

N° 41. $2a$: 14,364; $2b$: 14,276. — l : 544,5.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
1	0.0. 0	0.39.30	0.39.20
2	"	1.20.50	0.40.25
3	"	2. 2.10	0.40.43
4	0.3.40	2.39.40	0.39.55
5	0.8.50	3.23.40	0.40.44
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
15		10. 5.40	0.40.22,7

Moyenne... $\psi = 1^\circ\,14'\,9'',4$.

N° 42. $2a$: 13,603; $2b$: 13,596. — l : 592,8.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
0.5	0. 0. 0	0.25.40	0.51.20
1.0	"	0.53.20	0.53.20
1.5	"	1.16. 0	0.50.40
2.0	0. 7.30	1.38. 0	0.49. 0
2.5	0.11.50	2. 2.50	0 49. 8
3.0	"	2.29.20	0.49.47
3.5	0.17.40	2.52.20	0.49.14
4.0	0.18. 0	3.20.40	0.50.10
4 5	0.18.30	3.44 30	0.49.54
5.0	0.20.50	4.17.30	0.51.30
5.5	0.31. 0	4.29.20	0.48.58
33.0		27.29.30	0.49.59,1

Moyenne... $\psi = 1^\circ\,24'\,19'',2$.

N° 43. $2a$: 13,819; $2b$: 13,416. — l : 708,25.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
1	0. 0. 0	0 59.50	0.59.50
2	"	1.56. 0	0.58. 0
"	"	1.59.20	0.59.40
3	0.11.20	2.59.20	0.59.47
"	0.13. 0	2.59.10	0.59.43
4	0.25.20	3.56.40	0.59.10
"	0.34.50	3.57.20	0.59.20
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
19		18.47.40	0.59.21,0

Moyenne... $\psi = 1^\circ\,23'\,47'',9$.

Digitized by Google

Prismes en verre à gobeletterie, à base de soude.

N° 44. $2a$: 12,618; $2b$: 11,826.

l : 675,9.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
0.5	0. 0. 0	0.38.30	1.17. 0
1.0	"	1.14.50	1.14.50
1.5	"	1.53. 0	1.15.20
2.0	"	2.35.50	1.17.55
2.5	"	3. 6. 0	1.14.24
3.0	0. 5.10	3.41.10	1.13.43
3.5	0.11.40	4.20.30	1.14.26
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
14.0		17.29.50	1.14.59,3

Moyenne... $\psi = 1° 50' 56'',8$.

N° 45. $2a$: 11,976; $2b$: 11,750.

l : 534,5.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
0.5	0. 0. 0	0.30.30	1.1. 0
1.0	"	1. 3.20	1.3.20
1.5	0. 4.20	1.35. 0	1.3.20
2.0	"	2. 1.50	1.0.55
2.5	0.10.20	2.35.20	1.2. 8
3.0	0.11.50	3. 3.30	1.1.10
3.5	0.22.50	3.38.40	1.2.28
4.0	0.38.20	4. 9.30	1.2.22
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
18.0		18.37.40	1.2. 5,6

Moyenne... $\psi = 1° 56' 10'',2$.

N° 46. $2a$: 10,242; $2b$: 9,616.

l : 500,0.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
0.2	0. 0. 0	0.25.30	2. 7.30
0.4	"	0.41.50	1 52. 5
0.5	"	0.54.40	1.49.20
0.6	0. 6.20	1.10. 0	1 56.40
0.8	0. 8 30	1.30.10	1.52.42
1.0	"	1.47.30	1.47.30
"	0. 9.30	1.41.10	1.41.10
"	0.11.10	1.50.30	1.50.30
1.2	0.20. 0	2.15.40	1.53. 3
1.4	0.22.20	2.41. 0	1.55. 0
1.5	0.24.30	2.47.10	1.51.26
1.6	"	3.14.10	2. 1.21
1.8	0.30.20	3.33. 0	1.58.20
2.0	0.44.20	3.54. 0	1.57. 0
15.0		28.29.20	1.53.57,3

Moyenne... $\psi = 3° 47' 54'',6$.

Digitized by Google

Prisme en verre à gobeletterie, à base de potasse.

N° 47. $2a : 9{,}640$; $2b : 9{,}420$

$l : 505{,}0$.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
0,3	0° 0′ 0″	0°.48′.40″	2°.42′.13″
0,5	"	1.17. 0	2.34. 0
0,7	"	1 46.40	2.32.23
1,0	0. 9. 0	2.28.50	2.28.50
1,5	0.17.30	3.46.40	2.31. 6
2,0	0.29. 0	4.48.20	2.29.10
6,0		15. 6.10	2.31. 1,7

Moyenne... $\psi = 4° 59' 4'',0$.

Digitized by Google

Prismes en verre à glaces.

N° 48. $2a : 31,700$; $2b : 8,080$.

l : 1000,0.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
0.5	0. 0. 0	0.35.30	1.11. 0
1.0	"	1.10.20	1.10.20
1.5	"	1.45.30	1.10.20
2.0	0. 5.10	2.23.40	1.11.50
2.5	0.10. 0	3. 0.20	1.12. 8
3.0	"	3.35.20	1.11.47
3.5	0.12.30	4 13. 0	1.12.17
4.0	0.14.10	4.49.10	1.12.18
18.0		21.32.50	1.11.49,4
Pour 1 mètre.....			1.11.49,4

Moyenne... $\psi = 1° 11' 14'',0$.

l : 466,7.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
1	0. 0. 0	0.31.50	0.31.50
2	"	1. 2.50	0.31.25
3	0. 6.50	1.38.10	0.32.43
4	0.13.20	2.14.10	0.33.32
5	0.14.30	2.44.50	0.32.58
6	"	3.20.30	0.33.25
"	"	"	"
"	"	"	"
21		11.32.20	0 32.58,1

N° 49. $2a : 31,500$; $2b : 7,978$.

l : 951,5.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′	° ′ ″
0.5	0. 0. 0	0.33.50	1. 7.40
1.0	"	1. 4.20	1. 4.20
1.5	"	1.42.20	1. 8.14
2.0	"	2.20.10	1.10. 5
2.5	0. 2.40	2.55.50	1.10.20
3.0	0. 4.20	3.28.40	1. 9.53
3.5	0. 9. 0	4. 9.30	1.11.18
"	"	"	"
14.0		16.14.40	1. 9 37,1

Moyenne .. $\psi = 1° 13' 10'',0$.

Prismes en verre à vitres.

N° 50. $2a : 27,6$; $2b : 3,570$.

l : 185,0.

0.5	0. 0. 0	1.16.20	2.32.40
"	"	1.18. 0	2.36. 0
1.0	"	2.43.10	2.43.10
1.1	0. 4.10	2.58.20	2.41.59
1.2	"	3.12. 0	2.40. 0
1.3	0.10.20	3.28.40	2.40.23
1.5	0.14.40	4. 9.30	2.46.20
7.1		19. 6. 0	2.41.24,5

Moyenne... $\psi = 14° 32' 28'',6$.

N° 51. $2a : 30,6$; $2b : 3,140$.

l : 435,5.

0.5	0. 0. 0	4.13. 0	8.26 0
0.6	"	4.46.10	7.56.57
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
1.1		8.59.10	8.10. 0,9

Moyenne... $\psi = 18° 45' 29'',3$.

N° 52. $2a : 30,4$; $2b : 2,966$.

l : 243,8.

0.2	0. 0. 0	1. 4.50	5.24.10
0.3	"	1.40. 0	5.33.20
0.5	0. 9. 0	2.41.10	5.22.20
"	0.13.40	2.35.50	5.11.40
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"
1.5		8. 1.50	5.21.13,4

Moyenne... $\psi = 21° 57' 34'',1$.

Digitized by Google

Tableau N° V. — CYLINDRES CREUX EN CUIVRE JAUNE, A BASE CIRCULAIRE.

(Détermination des changements de volume.)

N° 53. d : 23,050; d_1 : 20,042; e : 1,504; s : 101,784; s_1 : 315,500; l_1 : 1000,0; u : 315500.

Torsion... l : 1024,2.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	TUBES CAPILLAIRES — NUMÉRO 9. ω	NUMÉRO 9. $\frac{\omega}{p^2}$	NUMÉRO 10. ω	NUMÉRO 10. $\frac{\omega}{p^2}$
10	0. 0. 0"	3.16.30"	0.19.51"	1.2	0.0120	"	"
15	"	5. 7. 0	0.20.28	3.2	0.0142	"	"
20	0. 8.50	6.39.20	0.19.58	5.1	0.0128	2.3	0.0057
25	0. 9.20	8.32.20	0.20.30	6.9	0.0110	3.9	0.0062
30	0.12.30	10. 5.40	0.20.11	8.7	0.0097	4.9	0.0054
35	0.20.10	11.57.50	0.20.31	12.0	0.0098	7.1	0.0058
40	0.22.30	14. 8. 0	0.21.12	16.5	0.0103	9.0	0.0056
175		59.46.40	0.20.29,7		0.01140		0.00574
				δu : 0.0010431		0.0010537	

Moyenne... $\dot{\psi} = 0° 20' 0",6$.

Moyenne... 0.0010484.

Allongement... L : 950,60.

P	L_1	L	$L_1 - L$	NUMÉRO 10. Ω
100	950.67	950.60	0.07	44.2
150	950.72	950.60	0.12	66.5
200	950.74	950.60	0.14	87.5
250	950.81	950.61	0.20	108.9
300	950.90	950.64	0.26	130.1
350	950.93	950.63	0.30	150.5
400	951.00	950.64	0.36	173.8
450	951.06	950.66	0.40	194.6
500	951.12	"	0.46	217.7
2700			2.31	1173.8

$\Delta_1 L$: 0,0008555; $\Delta_1 u$: 0,07980; ΔL : 0,08708; Δu : 8,1224.

A : 0,091602; E : 10917.

Digitized by Google

N° 54. d : 14,172; d_1 : 9,910; e : 2,131; s : 80,601; s_1 : 77,143; l_1 : 715,56; u : 55200.

Torsion... l : 715,56.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	NUMÉRO 1. ω	NUMÉRO 1. $\frac{\omega}{p^2}$	NUMÉRO 3. ω	NUMÉRO 3. $\frac{\omega}{p^2}$	NUMÉRO 4. ω	NUMÉRO 4. $\frac{\omega}{p^2}$	NUMÉRO 6. ω	NUMÉRO 6. $\frac{\omega}{p^2}$	NUMÉRO 7. ω	NUMÉRO 7. $\frac{\omega}{p^2}$
5	0. 0. 0	4 21.30	0.52.18	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
10	"	8.59.40	0.53.58	19.4	0.194	17.0	0.170	10.5	0.105	3.7	0.037	2.0	0.020
15	0. 3.50	13.27.30	0.53.50	45.5	0.202	35.0	0.155	"	"	9.0	0.040	4.3	0.019
20	0. 6.50	18. 4.30	0.54.13	74.5	0.189	63.5	0.159	43.0	0.107	16.5	0.041	8.5	0.021
25	0.10.30	23. 0. 0	0.55.12	118.2	0.189	104.5	0.167	"	"	25.0	0.040	11.6	0.018
30	0.15.40	27.37.40	0.55.15	165.7	0.184	145.5	0.162	89.7	0.099	35.0	0.039	16.3	0.018
35	0.18. 0	32.19.20	0.55.25	199.4	0.163	205.0	0.167	"	"	44.7	0.037	20.6	0.017
40	0.25.50	37.12.20	0.55.48	270.0	0.168	252.5	0.158	177.6	0.111	60.0	0.038	26.9	0.017
180		165. 2.30	0.55. 0,8		0.1841		0.1626		0.1055		0.0389		0.0186
				δu : 0006499		0.0006797		0,0006288		0.0006556		0.0006422	

Moyenne... $\psi = 1^\circ 16' 52'',9$.

Moyenne... 0.0006512.

Digitized by Google

N° 54. (Suite.) Allongement... L : 666,18.

P	L_1	L	$L_1 - L$	NUMÉRO 9. Ω
70	666.24	666.18	0.06	14.9
100	666.26	"	0.08	22.5
140	666.29	666.19	0.10	31.4
170	666.30	666.18	0.12	35.6
200	666.33	"	0.15	41.6
250	666.39	666.19	0.20	52.2
300	666.45	"	0.26	62.3
400	666.55	666.23	0.32	80.8
1630			1.29	341.3

$\Delta_1 L$: 0,0007914; $\Delta_1 u$: 0,01916; ΔL : 0,06379; Δu : 1,5443, A : 0,095753; E : 10444.

Digitized by Google

N° 55. d : 10,094; d_1 : 6,063; e : 2,0155; s : 51,152; s_1 : 28,871; l_1 : 1012,0; u : 29217.

Torsion... l : 1012,0.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	NUMÉRO 3. ω	NUMÉRO 3. $\frac{\omega}{p^2}$	NUMÉRO 7. ω	NUMÉRO 7. $\frac{\omega}{p^2}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	″	″	″	″
2	0. 1. 0	8.21.10	4.10.35	″	″	″	″
4	0. 3.10	16.34.30	4. 8.37	6.0	0.375	″	″
6	0. 5.50	25. 0.10	4.10. 2	15.0	0.417	1.5	0.042
8	0.10. 0	33.18.30	4. 9.49	24.2	0.378	2.7	0.043
10	0.35.40	41.42.10	4.10.13	37.5	0.375	4.0	0.040
12	2.14.20	49.58. 0	4. 9.50	51.5	0 358	5.3	0.037
42		174.54.30	4. 9.52,2		0.3806		0.0402
				δu : 0.001591		0.001390	

Moyenne... $\psi = 4° 6' 54'',7$.

Moyenne... 0,0014905.

Allongement.... L : 959,00.

P	L_1	L	$L_1 - L$	NUMÉRO 10. Ω
40	959.08	959. 0	0.08	″
80	959.16	″	0.16	″
120	959.25	″	0.25	11.3
160	959.31	″	0.31	14.4
200	959.40	″	0.40	17.2
240	959.47	959.01	0.46	21.9
280	959.53	″	0.52	25.7
320	959.58	″	0.57	29.8
400	959.73	959 06	0.67	35.3
440	959.80	″	0.74	39.2
2280			4.16	194.8

$\Delta_1 L$: 0.0018245; $\Delta_1 u$: 0.01655; ΔL : 0.09333; Δu : 0.8466; A : 0.097317; E : 10276.

Digitized by Google

Tableau N° VI. — PRISMES CREUX A BASE RECTANGULAIRE, EN CUIVRE JAUNE. (Détermination des changements de volume.)

N° 56. $2a$: 14,098; $2b$: 14,020; $2a_1$: 10,149; $2b_1$: 10,071;
e : 1,9745; s : 95,440; s_1 : 102,214; l_1 : 1000,28; u : 102243.

Torsion... l : 1000,28.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	TUBES CAPILLAIRES. NUMÉRO 7. ω	NUMÉRO 7. $\frac{\omega}{p^2}$	NUMÉRO 10. ω	NUMÉRO 10. $\frac{\omega}{p^2}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″				
2	0. 0. 0	1.56. 0	0.58. 0	"	"	"	"
4	0. 2.20	3.56.50	0.59.12	"	"	"	"
6	0. 3.40	5.55.40	0.59.17	6.4	0.178	"	"
8	0.10.40	7.52.30	0.59. 4	10.8	0.169	"	"
10	0.13.50	9.52.30	0.59.15	18.2	0.182	2.8	0.028
12	0.17.10	11.56.20	0.59.42	25.3	0.176	"	"
14	0.17.50	14. 9.10	1. 0.39	35.7	0.182	4.8	0 027
16	0.19. 0	16.12.10	1. 0.46	46.4	0.181	7.8	0.030
18	0.22.30	18.19.10	1. 1. 4	55.8	0.172	"	"
20	0.30. 0	20.20. 0	1. 1. 0	69.0	0.172	13.7	0.034
22	0.32. 0	22.23.30	1. 1. 4	81.9	0.169	"	"
24	0.34.10	24.26.40	1. 1. 7	97.3	0.169	17 2	0.030
26	0.48.30	26.29.50	1. 1. 9	112.6	0.167	19.1	0.028
28	0.56.20	28.42.40	1. 1.31	131.6	0.168	22.0	0.028
30	1.16.30	31. 5.30	1. 2.11	145.9	0.162	24.5	0.027
32	2. 6.20	33.25.10	1. 2.40	"	"	27.8	0.027
35	4. 0.30	36.13.20	1. 2. 6	"	"	32.5	0.027
307		313.17. 0	1. 1.25,4		0.1728		0.0286
				δu : 0.005966		0.005250	

Moyenne... $\psi = 1° 1' 15'',1$. Moyenne... 0.005608.

Allongement... L : 937,28.

P	L_1	L	$L_1 - L$	NUMÉRO 9 Ω	P	NUMÉRO 10. Ω
40	"	"	"	11.8	"	"
80	"	"	"	24.3	"	"
100	937.37	937.28	0.09	29.3	100	17.6
120	937.39	"	0.11	36.6	150	26.2
160	937.44	"	0.16	47.8	200	35.3
200	937.51	937.30	0.21	58.4	250	44.7
240	937.53	"	0 23	71.8	300	52.7
280	937.57	"	0.27	87.2	350	61.5
320	937.60	"	0.30	103.5	400	70.6
360	937.65	937.32	0.33	116.3	450	80.6
400	937.77	937.40	0.37	129 1	500	89.8
2300			2.07	716 1	2700	479.0

$\Delta_1 L$: 0.0009495 $\Delta_1 u$: 0.02848 0.03256

ΔL : 0.09062; Δu : 3.1075; A : 0.096690; E : 10342.

Digitized by Google

N° 57. $2a$: 16,450; $2b$: 11,590; $2a_1$: 12,798; $2b_1$: 7,938; e : 1,826; s : 89,070; s_1 : 101,585; l_1 : 979,5; u : 99502,5.

Torsion... l : 979,5.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	NUMÉRO 5. ω	NUMÉRO 5. $\frac{\omega}{p^2}$	NUMÉRO 7. ω	NUMÉRO 7. $\frac{\omega}{p^2}$	NUMÉRO 10. ω	NUMÉRO 10. $\frac{\omega}{p^2}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″						
2	0. 0. 0	2.22.30	1 11.15	6.4	1.600	"	"	"	"
4	0 0.40	4.44.50	1.11.12	25.0	1.562	"	"	"	"
6	0.10. 0	7.18.50	1.13. 8	57.3	1.592	"	"	3.5	0.0972
8	0.21.20	9.45.20	1.13.10	95.2	1.488	"	"	6.4	0.1000
10	"	12.12.50	1.13.17	170.5	1.705	44.0	0.440	10.4	0.1040
12	0.29.20	14.40.20	1.13.22	242.0	1.681	60.2	0.418	14.5	0.1007
14	0.35.30	16.43.30	1.11.41	310.2	1.582	78.6	0.401	20.3	0.1041
16	0.38.10	19.12. 0	1.12. 0	"	"	116.0	0 453	26.0	0.1015
18	0.41.50	21.34.50	1.11.56	"	"	138.0	0.429	33 3	0.1028
20	0.48. 0	23.44.10	1.11.12	"	"	182.7	0.457	38.9	0.0972
110		132.19.10	1.12.10,4		1.6017		0.4330		0.1009
				δu : 0.01737		0.01495		0.01852	

Moyenne... $\psi = 1° 13\ 41'',0$.

Moyenne... 0.01695.

Allongement... L : 925,05.

P	L_1	L	$L_1 - L$	NUMÉRO 5. Ω	NUMÉRO 10. Ω
35	"	"	"	100.5	"
80	"	"	"	259.5	"
100	925.15	925.05	0.10	320.4	18.3
120	925.17	"	0.12	397.0	"
150	925.21	"	0.16	"	28.3
200	925.29	"	0.24	"	37.9
250	925.30	"	0.25	"	48.7
300	925.35	"	0.30	"	58.2
350	925.39	925.06	0.33	"	69.8
400	925.40	925.04	0.36	"	78.2
450	925.48	925.06	0.42	"	85.1
500	925.55	"	0.49	"	95.6
2800			2.77	1077.4	520.1

$\Delta_1 L$: 0.0009823 $\Delta_1 u$: 0.03487 0.03385

Moyenne... 0.03436

ΔL : 0.08749; Δu : 3.0604. A : 0.094685; E : 10561.

Digitized by Google

N° 58. $2a$: 24,050; $2b$: 9,000; $2a_1$: 20,013; $2b_1$: 4,963; e : 2,0185; s : 117,14; s_1 : 99,313; l_1 : 1019,0; u : 101200.

Torsion. l : 1019,0.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	NUMÉRO 7. ω	NUMÉRO 7. $\frac{\omega}{p^2}$	NUMÉRO 10. ω	NUMÉRO 10. $\frac{\omega}{p^2}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″				
2	0. 0. 0	2.12.10	1.6. 5″	12.8	3.200	″	″
4	″	4.27.20	1.6.50	58.6	3.662	″	″
6	″	6.43.50	1.7.16	132.8	3.689	27.1	0.753
8	0. 4.30	8.54.40	1.6.50	224.6	3.509	44.4	0.694
10	0.13.40	11.19.40	1.7.58	336.4	3.364	64.2	0.642
12	0.23.50	13.19.20	1.6.37	″	″	94.1	0.653
14	0.37.40	15.33.50	1.6.42	″	″	128.9	0.658
16	0.48.20	17.42.10	1.6.23	″	″	160.0	0.625
18	1. 4.30	19.53.30	1.6.18	″	″	207.6	0.641
20	1.30. 0	22.16.50	1.6.52	″	″	250.7	0.627
22	1.54.10	24.34.40	1.7. 2	″	″	303.6	0.627
24	2.15.20	26.46.30	1.6.56	″	″	374.0	0.649
156		173.44.30	1.6.49,4		3.485		0.6569
				δu : 0.12032		0.12059	

Moyenne.. $\psi = 1° 5' 34'',5$.

Moyenne... 0.12045.

Allongement..... L : 920,70.

P	L_1	L	$L_1 - L$	NUMÉRO 9. Ω
50	″	″	″	12.9
100	920.78	920.70	0.08	28.1
150	″	″	″	49.0
200	920.86	″	0.16	60.0
250	″	″	″	73.8
300	920.95	″	0.25	90.0
350	″	″	″	103.8
400	921.01	″	0.31	112.2
″	921.02	″	0.32	112.9
2200			1.12	642.7

$\Delta_1 L$: 0.0008000; $\Delta_1 u$: 0.02673; ΔL : 0.09371; Δu : 3.1312.

A : 0.101783; E : 9824,8.

Digitized by Google

Tableau N° VII. — CYLINDRES CREUX EN TOLE, A BASE CIRCULAIRE.
(Détermination des changements de volume.)

N° 59. d : 18,050; d_1 : 15,001; e : 1,525; s : 79,160; s_1 : 176,730; l_1 : 968,7; u : 171192.

Torsion... l : 958,0.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	TUBE CAPILLAIRE NUMÉRO 7. ω	$\frac{\omega}{p^2}$
5	0. 0. 0	1.42.50	0.20.34	"	"
10	0. 3.10	3.22.10	0.20.13	— 3.5	0.035
15	0. 3.50	4.58.50	0.19.55	— 6.9	0.031
20	0. 7. 0	6.44.20	0.20.13	— 12.3	0.031
25	0.12. 0	8.22.30	0.20. 6	— 19.6	0.031
30.	0.20.40	9.54.10	0.19.49	— 26.5	0.029
105		35. 4.50	0.20. 2,8		— 0.0314

Moyenne... $\psi = 0.20.55,6$. δu : — 0.001084.

Allongement... L : 933,31.

P	L_1	L	$L_1 - L$	NUMÉRO 10. Ω
100	933.38	933.31	0.07	"
150	933.43	933.32	0.11	"
200	933.47	"	0.15	50. 0
250	933.50	"	0.18	62.2
300	933.52	"	0.20	74.6
350	933.58	933.35	0.23	87.5
400	933.62	933.36	0.26	100.6
450	933.65	"	0.29	111.8
500	933.70	933.37	0.33	124.2
2700			1.82	610.9

$\Delta_1 L$: 0.0006741; $\Delta_1 u$: 0.04577; ΔL : 0.05336; Δu : 3.6231.
A : 0.057174; E : 17490.

Digitized by Google

N° 60. d : 13.528; d_1 : 11.454; e : 1.037; s : 40.693; s_1 : 103.040; l_1 : 537,0; u : 55332.

Torsion... l : 537,0.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	NUMÉRO 3. ω	NUMÉRO 3. $\frac{\omega}{p^2}$	NUMÉRO 7. ω	NUMÉRO 7. $\frac{\omega}{p^2}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″				
2	0. 0. 0	1.15.20	0.37.40	"	"	"	"
4	"	2.31.20	0.37.50	— 5.0	0.312	— 1.0	0.062
6	0. 0.30	3.42.40	0.37. 7	— 9.8	0.272	— 1.8	0.050
8	0. 2.50	4.56.30	0.37. 4	— 17.0	0.266	— 3.2	0.050
10	0. 4. 0	6.12.50	0.37.17	— 30.2	0.302	— 4.7	0.047
12	0. 5.20	7.27.30	0.37.17	— 39.4	0.274	— 6.2	0.043
14	0. 6. 0	8.39.20	0.37. 6	— 46.0	0.235	— 8.0	0.041
16	0. 7.30	9.52. 0	0.37. 0	— 56.8	0.222	— 10.4	0.041
18	0.10. 0	11. 7. 0	0.37. 3	"	"	— 12.2	0.038
20	0.11.10	12.20.30	0.37. 2	"	"	— 15.5	0.039
110		68. 5. 0	0.37. 8,2		— 0.2690		—0 0457
				δu : — 0.001124		— 0.001578	

Moyenne... $\psi = 1° 9' 9'',3$. Moyenne... — 0.001351.

Allongement... L : 456,65 (*).

P	NUMÉRO 10. Ω
100	15.4
150	22.4
200	30.8
250	38.1
300	44.7
350	51.9
400	60.2
450	68.5
500	76.2
2700	408.2

$\Delta_1 u$: 0.027739; Δu : 1.1288.

(*) Ce tube est trop court pour que ses allongements puissent être mesurés avec une précision suffisante.

Digitized by Google

N° 61. d : 9,380; d_1 : 7,934; e : 0,723; s : 19,655; s_1 : 49,448; l_1 : 1003,0; u : 49596.

Torsion... 1003,0.

p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	NUMÉRO 2. ω	NUMÉRO 2. $\frac{\omega}{p^2}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″		
0.5	0. 0. 0	2.52.30	5.45, 0	"	"
1.0	0. 6. 0	5.52.50	5.52.50	— 2.5	2.50
1.5	0.13.30	9. 1.10	6. 0.47	— 6	2.67
2.0	0.14.40	11.44.10	5.52. 5	— 14	3.50
2.5	0.26.50	14.32. 0	5.48.48	— 17	2.72
3.0	0.34.40	17.13.40	5.44.33	— 28	3.11
3.5	0.39.10	20. 6.40	5.44.46	— 35	2.86
4.0	1. 2. 0	22.11.50	5.32.57	— 43	2.69
4.5	1.24.40	24.49. 0	5.30.54	— 58	2.86
5.0	2.50. 0	27.19.20	5.27.52	— 74	2.96
27.5		155.43.10	5.39.45,1		—2.874

Moyenne... $\psi = 5° 38' 44'',1$. δu : — 0.011594

Allongement... L : 962,08.

P	L_1	L	$L_1 - L$	P	NUMÉRO 9. Ω
40	962.17	962.08	0.09	50	36.2
80	962.30	962.10	0 20	100	72.5
120	962.44	962.14	0.30	150	108.8
160	962.57	962.15	0.42	200	145.5
200	962.76	962.20	0.56	250	182.3
400	963.33	962.28	1.05	300	210.4
"	963.31	"	1.03	350	254.9
"	"	"	"	400	284.4
1400			3.65	1800	1295.0

$\Delta_1 L$: 0.002607; $\Delta_1 u$: 0.06582; ΔL : 0.05124; Δu : 1,2937.
A : 0.053256; E : 18777.

Digitized by Google

N° 62. — Prisme en bois de chêne. $2a : 20,25$; $2b : 20,20$.

	l : 1001,0.			l : 499,9.			l : 249,9.		
p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
1	0.30. 0	6. 3.20	6. 3.20	0. 0. 0	3 1.30	3. 1.30	0. 0. 0	1.36′ 0	1.36. 0
2	1.12.20	12. 6.10	6. 3. 5	0.43.50	6. 6.40	3. 3.20	0.18.30	3.15.40	1.37.50
3	2. 7.10	18. 3. 0	6. 1. 0	1.14.10	9.16. 0	3. 5.20	1.10. 0	5. 6.20	1.42. 7
4	4.22.30	24.10.10	6. 2.32	2.37.30	12 26.30	3. 6.38	4 40. 0	6.34.20	1.38 35
5	5. 7.20	30.21.30	6. 4.18	3.28.40	15.36.10	3. 7.14	5. 0. 0	8. 3 10	1.36.38
6	6.27.40	36.31.50	6. 5.18	4. 0. 0	18.58.50	3. 9.48	5.31.20	9.15.50	1 32.38
7	7. 1.50	42.36.30	6. 5.13	6.31. 0	21.52.30	3. 7.30	8.16. 0	10.35. 0	1.30.43
8	9.45.30	49.23.30	6.10.26	7.42.50	25. 0.10	3. 7.31	10.23.50	11 55.20	1.29.25
9	14.37.20	55.52.40	6.12.31	8.42.50	28. 0. 0	3. 6.40	12.38.20	13.25.40	1.29.31
10	20.27.20	62.31.30	6.15. 9	13.57.40	31. 4.50	3. 6.29	14.42.30	14.57.30	1.29.45
55		337.40.10	6. 8.22,0		171.23.10	3. 6.54,4		84.44.50	1.32.59,8
	Pour 1 mètre...		6. 8. 0,0			6 13.53,4			6.12. 8,2

Moyenne... $\psi = 6^\circ\,11'\,20'',5$.

N° 63. — Prisme en bois de sapin.. $2a : 9,931$; $2b : 9,807$.

	l : 498,96.			l : 250,10.		
p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
0.1	0.10.10	5.53.50	58.58.20	0. 0. 0	2.59.10	29.51.40
0.2	1. 8 30	11.58. 0	59.49.35	0.15 40	5.57.10	29.45.50
0.3	1.15.20	17.52.20	59.34.30	1. 2.50	8.49.30	29.25. 0
0.5	2.33.30	30.24. 0	60.48. 0	4. 1.20	14.45. 0	29.30. 0
0.6	7.49.40	36. 7.50	60.13. 3	5.55.40	18. 0.30	30. 0 50
0.8	10. 5.30	47.59.30	59.57.42	10. 8. 0	26. 0.40	32.30.50
1.0	14.37.40	60.20.20	60.20.20	12. 5.10	33. 8.40	33. 8 40
3.5		210.35.50	60 10.14,3		109.40.40	31.20.11,4
	Pour 1 mètre.....		120.35 31,5			125.17.45,6

Moyenne... $\psi = 122^\circ\,56'\,38'',5$.

Digitized by Google

N° 64. — Prisme en bois de chêne. $2a : 24,65$; $2b : 5,765$.

l : 999,5.				l : 498,0.			l : 249,5.		
p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
0.2	0. 0. 0	22.16.10	111.20.50	0. 0. 0	11.21. 0	56.45. 0	0. 0. 0	5.30.30	27.32.30
0.3	2.26. 0	33.12. 0	110.40. 0	1.40. 0	17.14.20	57.27.50	1.26.50	8. 8.40	27. 8.50
0.5	4. 8.30	54.35.10	109.10.20	3. 4.10	29. 2.50	58. 5.40	2. 1.20	14. 7.30	28.15. 0
0.7	10.20.10	76.30.40	109.18. 6	6.16.20	40.51.10	58.21.40	3.35.20	20.22.40	29. 6.40
0.8	18.30.50	85.15.40	106.34.35	10. 2. 0	45.22.40	56.43.20	4.50.50	24.32.30	30.40.37
1.0	44.10.20	110.20. 0	110.20. 0	21.57.20	58. 8.10	58. 8.10	13.33.50	31.51.20	31.51.20
3.5		382. 9.40	109.11.20,0		202. 0.10	57.42.54,3		104.33.10	29.52.20
Pour 1 mètre.....			109.14.37,0			115.53.37,7			119.43.41,5

Moyenne... $\psi = 114° 57' 18'',7$.

N° 65. — Prisme en bois de sapin. $2a : 24,45$; $2b : 5,780$.

l : 998,0.				l : 494,0.				l : 247,0.		
p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	p	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$	θ	ψ_1	$\frac{\psi_1}{p}$
	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″		° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″	° ′ ″
0.2	1. 2.20	40.41. 0	203.25. 0	0.2	0.30. 0	19.25.10	97.25.50	0. 0. 0	9.22.10	46.50.50
0.3	1.58. 0	60.30. 0	201.40. 0	0.3	1. 1.10	29.26. 0	98. 6.40	"	14.11.30	47.18.20
0.5	3 45.50	95.30.20	191. 0.40	0.5	5.20.30	48.34.20	97. 8.40	3.21.10	24.45 30	49 31. 0
0.6	7.10.40	121.17.30	203.15.50	0.7	8.41. 0	65.31. 0	95.30. 0	6.18.20	36.17.50	51.51.10
0.7	13.20.20	141. 0. 0	201.25 43	0.8	12. 0.40	78.20.40	97.55.20	8.22. 0	42.12.30	52.45.37
"	"	"	"	1.0	23. 7.30	95.50. 0	95.50. 0	16. 3.40	52. 2.20	52. 2.20
2.3		458.58.50	199.33.25,2	3.5		337. 7 10	96.19.11,4		178.51.50	51. 6.14,0
Pour 1 mètre.....			199.57.24,8			193. 1.32,9				204.49.30,7

Moyenne... $\psi = 199° 16' 9'',5$.

Digitized by Google

SUR LA FERMENTATION ALCOOLIQUE;

PAR M. MARCELLIN BERTHELOT.

On a réuni dans un groupe commun, et désigné sous le nom générique de *sucres*, tous les corps susceptibles d'éprouver la fermentation alcoolique. Le sucre de canne est le type de ce groupe, dont il constitue le terme le plus anciennement connu; auprès de lui sont venus se classer le sucre de raisin ou glucose, le sucre de canne interverti par les acides, le sucre de lait qui ne devient fermentescible qu'après avoir subi cette même action des acides, enfin, tout récemment, le mélitose.

Tous ces corps, soumis à l'action de la levûre de bière, sont aptes à produire de l'alcool et de l'acide carbonique; dans d'autres conditions, ils fermentent avec génération d'acide lactique ou d'acide butyrique. Tous sont neutres et représentés dans leur composition par du carbone et de l'eau; tous, enfin, jouissent de certaines propriétés générales, telles que celle de s'unir aux bases énergiques, de se détruire avec une grande facilité sous l'influence de la chaleur et sous l'influence des réactifs.

Dans le cours de mes recherches sur la synthèse des corps gras neutres, j'ai été conduit à rapprocher des sucres proprement dits un grand nombre d'autres substances qu'en éloignait jusqu'ici l'absence de fermentation au contact de la levûre. La glycérine, la mannite, la dulcine, etc., et les sucres eux-mêmes, jouissent en effet de propriétés communes d'une extrême importance : ces corps s'unissent aux acides et forment des combinaisons neutres analogues aux corps gras par tous leurs caractères; ce sont de véritables alcools polyatomiques. Neutres comme les sucres véritables, douées d'un goût, d'une solubilité semblables, la glycérine, la mannite, etc., s'unissent, de même que les su-

Digitized by Google

cres, avec les bases puissantes, et sont transformées d'une manière analogue par les agents chimiques; elles ont d'ailleurs à peu près la même composition centésimale que les sucres proprement dits, et se représentent par des formules du même ordre, dont le carbone est un multiple de 6. Seulement, tandis que les sucres renferment l'hydrogène et l'oxygène dans les proportions convenables pour former de l'eau, la glycérine, la mannite, etc., contiennent un excès d'hydrogène, différence qui correspond à une plus grande stabilité.

Ces analogies m'ont conduit à chercher s'il ne serait pas possible de faire éprouver à la glycérine, à la mannite, etc., les mêmes phénomènes de fermentation que manifestent les sucres proprement dits, et, principalement, de provoquer, dans tous ces corps, la fermentation alcoolique.

J'ai en effet réussi à faire fermenter directement la glycérine, la mannite, la dulcine et la sorbine avec production d'alcool et d'acide carbonique. Cette fermentation s'accompagne, en général, d'un dégagement d'hydrogène, ce qui est une conséquence de la composition des corps fermentiscibles. La formation de l'alcool ainsi provoquée n'est point en général précédée par la transformation préalable de la mannite, de la glycérine, etc., en sucre proprement dit.

J'ai également provoqué la fermentation lactique (1) et la fermentation butyrique de plusieurs de ces mêmes substances.

En poursuivant ces expériences, j'ai été conduit à chercher si les conditions des phénomènes précédents, conditions très-distinctes de l'emploi de la levûre, pourraient déterminer la transformation alcoolique des sucres proprement dits, celle du sucre de lait, celle enfin de diverses substances métamorphosables en sucre sous l'influence

(1) Voyez FREMY, *Comptes rendus*, tome IX, page 165 (1839).

Digitized by Google

des acides, telles que la gomme et l'amidon. Dans les mêmes circonstances, la fermentation alcoolique des trois derniers corps se produit en effet; elle n'est pas précédée par leur transformation en sucre proprement dit. Cette fermentation paraît donc directe, aussi bien que celle de la mannite et de la glycérine.

En exposant les résultats de ces observations, j'en discuterai les conditions multiples et je chercherai, autant que possible, à analyser le rôle des diverses substances dont la présence est indispensable à l'accomplissement des phénomènes. Je vais résumer ici les principaux résultats de cette étude.

Ces expériences réclament le concours d'une température inférieure à 50 degrés; elles exigent, pour s'accomplir, plusieurs semaines ou même plusieurs mois; elles ne donnent pas seulement naissance à de l'alcool, mais aussi à plusieurs autres substances formées simultanément. Il est d'ailleurs nécessaire de faire intervenir l'eau, milieu commun de toute fermentation, le carbonate de chaux et une matière azotée de nature animale ou analogue.

Sans carbonate de chaux, la mannite, la glycérine, etc., ne peuvent point, dans les circonstances ordinaires, donner lieu à la fermentation alcoolique. Si l'on opère avec les sucres proprement dits, la présence du carbonate de chaux n'est plus indispensable; toutefois elle exerce encore une influence marquée sur les phénomènes et augmente la proportion de l'alcool formé. Dans ces expériences, le carbonate de chaux paraît agir en maintenant la liqueur neutre par la saturation des acides produits (1) et en dirigeant dans un sens déterminé la décomposition du corps azoté qui provoque la fermentation. Aussi j'ai pu, en opérant avec le glu-

(1) M. Chevreul a déjà insisté sur la nécessité de maintenir les liqueurs dans un état constant, lequel tend à changer par le fait de la réaction elle-même pendant la durée de la fermentation alcoolique. (*Leçons sur la teinture*, article Sucre.)

Digitized by Google

cose, remplacer le carbonate de chaux par un grand nombre d'autres corps propres à remplir la même fonction neutralisante, tels que les carbonates terreux, divers carbonates et oxydes métalliques, tels enfin que des métaux mêmes, le fer et le zinc. La plupart de ces essais ont été reproduits en même temps, et d'une manière comparative, avec la levûre de bière.

L'étude du corps nécessaire pour provoquer ces métamorphoses, celle du ferment, a particulièrement fixé mon attention. Ce ferment était, en général, formé par de la caséine; mais toute matière azotée de nature analogue est apte à exercer la même influence sur la mannite. Les expériences très-diverses que j'ai faites sur ce point confirment d'ailleurs et étendent les recherches déjà anciennes de M. Colin sur le rôle de ces corps dans la fermentation alcoolique du sucre (1). Aucune substance azotée, en dehors de la catégorie précédente, n'a provoqué les mêmes phénomènes.

L'influence des matières azotées tient à leur composition et non à leur forme, car on opère les mêmes changements sur la mannite et sur les sucres avec les substances les plus diverses, et notamment avec la gélatine, composé artificiel dénué de toute structure organique proprement dite.

Le développement d'êtres vivants particuliers, auquel on avait attribué un rôle dans la fermentation alcoolique des sucres, n'est nullement nécessaire au succès de mes expériences. On peut l'éviter en opérant à l'abri du contact de l'air; la fermentation n'en est ni entravée ni même ralentie.

Dès lors, dans ces expériences, la cause de la fermentation paraît résider dans la nature chimique des corps propres à jouer le rôle de ferment et dans les changements

(1) Voyez Thenard, *Traité de Chimie*, t. V, p. 63 (1836). — Colin, *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, tome XXVIII, page 128, et tome XXX, page 42 (1825).

Digitized by Google

successifs qu'éprouve leur composition. Ces changements sont encore peu connus; mais ils sont attestés par un phénomène caractéristique et que ne présente pas l'action de la levûre de bière sur le sucre : en même temps que la mannite se détruit, la matière azotée se décompose sans pourrir et perd, sous forme gazeuse, presque tout l'azote qui entre dans sa constitution. Ainsi, le corps sucré et le corps azoté se décomposent en même temps, exerçant l'un sur l'autre une influence réciproque.

Quelle est la nature intime de ce double phénomène et quelle est sa relation avec les actions de contact (1) auxquelles ressemble tant celle de la levûre de bière sur le sucre? C'est ce que nous ignorons encore presque complétement; mais, je le répète, on est conduit à penser que l'action des matières azotées et celle de la levûre de bière elle-même dépendent, non de leur structure organisée, mais de leur nature chimique, de même que l'action de l'émulsine sur l'amygdaline, de la diastase sur l'amidon, du suc pancréatique sur les corps gras neutres; de même que l'action de la glycérine sur l'acide oxalique, de l'acide sulfurique et des corps électronégatifs sur le sucre de canne (inversion), sur l'alcool (éthérification), et sur l'essence de térébenthine (modification isomérique). L'action de la diastase, de l'émulsine, du suc pancréatique, a pu être éclaircie jusqu'à un certain point, parce que ces substances agissent à l'état de dissolution; la levûre ne se prête pas à ce genre de contrôle. Mais l'efficacité analogue, quoique moins prononcée, que possèdent les matières azotées d'origine animale, même en l'absence de toute structure organique spéciale et de toute formation d'êtres vivants, tend à assimiler la fermentation alcoolique aux diverses

(1) Voyez THENARD, *loco citato*. — MITSCHERLICH, *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, tome VII, page 30 (1843).

Digitized by Google

fermentations provoquées par l'émulsine, par la diastase et par le suc pancréatique.

Avant d'exposer les expériences que j'ai faites avec la mannite, la dulcine, la glycérine, la sorbine, le sucre de canne, le glucose, le sucre de lait, la gomme, l'amidon, enfin avec les diverses matières azotées, j'indiquerai quels procédés, fondés pour la plupart sur la méthode des dissolvants, j'ai suivis dans l'analyse des produits de ces fermentations.

Procédés analytiques.

Ces procédés comprennent les objets suivants :
Analyse des gaz ;
Extraction et dosage de l'alcool ;
— des acides lactique, butyrique, acétique ;
Recherche de la glycérine et de la mannite ;
— des corps gras ;
Recherche et dosage du sucre ;
Examen microscopique des produits.
Purification des matières premières.

1. *Gaz.* — Les liquides sont contenus dans des flacons complétement remplis et munis de tubes à dégagement ; on recueille les gaz sur le mercure. Ces gaz sont un mélange d'acide carbonique, d'hydrogène et d'azote ; pour les analyser, on absorbe l'acide carbonique par la potasse, on mêle le résidu avec de l'oxygène pur et on le fait détoner ; on absorbe l'excès d'oxygène par l'acide pyrogallique : l'azote demeure comme résidu final.

2. *Alcool.* — On isole l'alcool par distillation et on en dose la proportion par la détermination de sa densité. Si cette proportion est trop faible, on distille de nouveau le premier produit obtenu et on recueille seulement le premier dixième ; enfin, dans certains cas, on redistille ce

Digitized by Google

dixième une troisième fois, de façon à le réduire à une fraction de centimètre cube. On a recours à cette deuxième et à cette troisième opération, principalement lorsque l'on veut obtenir l'alcool très-concentré pour l'étudier séparément et vérifier sa nature en le transformant en gaz oléfiant. Dans ce cas, après la dernière distillation, on précipite l'alcool de ses solutions aqueuses au moyen du carbonate de potasse pur et cristallisé.

3. *Acides lactique, acétique, butyrique.* — Après la distillation, on concentre le liquide resté dans l'alambic et on le mélange avec deux fois son volume d'alcool; au bout de quelques heures, le lactate de chaux que peut renfermer la liqueur cristallise. On l'isole, on concentre l'eau mère et on la traite encore par l'alcool, ce qui fournit souvent des cristaux de mannite non décomposée, si l'on a opéré avec cette substance. On répète ces traitements avec précaution, tant qu'on obtient de la mannite et du lactate de chaux; puis viennent des cristallisations confuses de butyrate de chaux.

Pour déterminer la proportion des acides butyrique et acétique, on ajoute aux eaux mères précédentes un peu d'acide sulfurique étendu, et on les agite trois ou quatre fois avec de l'éther; on évapore l'éther et on détermine la proportion d'acide butyrique par un essai alcalimétrique exécuté avec de l'eau de baryte (1). Après avoir enlevé l'acide butyrique, on distille le résidu liquide avec précaution, et on obtient dans le récipient l'acide acétique, dont on détermine la quantité à l'aide de l'eau de baryte titrée.

On sature par la craie le résidu de la cornue, et on l'évapore; si l'on a opéré avec la mannite ou avec les sucres,

(1) Ce procédé n'est pas tout à fait rigoureux, parce que le butyrate de baryte possède une certaine réaction alcaline, et que de plus l'éther enlève à l'eau un peu des acides acétique, sulfurique et autres qu'elle renferme.

Digitized by Google

ce résidu se résout presque entièrement en lactate de chaux, lequel ne cristallise parfois qu'au bout de quelques jours.

4. *Glycérine.* — Dans les expériences faites avec la mannite et avec les sucres, on a recherché s'il y avait formation de glycérine ; à cet objet, on a traité par l'alcool absolu les derniers résidus des opérations précédentes. L'extrait obtenu a toujours été très-faible ; soumis à l'action de l'iodure de phosphore, il n'a point fourni de propylène iodé.

5. *Mannite.* — Dans les expériences faites avec les sucres, on a cherché s'il y avait formation de mannite. On a examiné d'abord les cristallisations successives formées au sein des solutions aqueuses ou alcoolisées : on a pu ainsi, dans plusieurs cas, réduire les eaux mères à quelques centimètres cubes. On lave le dernier résidu avec de l'alcool absolu, puis on le traite par l'alcool bouillant, lequel peut encore en extraire un peu de lactate de chaux. Cela fait, on évapore spontanément la dernière solution alcoolique ; on examine au microscope tous les produits des opérations successives pour y rechercher la mannite, et on les traite séparément par l'acide oxalique. On élimine ainsi la chaux, on évapore au bain-marie, on lave les résidus avec de l'éther et l'on essaye de faire cristalliser dans l'alcool ce que l'éther ne dissout pas ; enfin tous les produits sont abandonnés à un repos très-prolongé pour faciliter la cristallisation.

Par ces traitements, après les fermentations alcooliques de la mannite, on réussit presque toujours, sans grande difficulté, à isoler une portion de cette substance inaltérée. Mais durant les fermentations alcoolique, lactique et butyrique des sucres proprement dits, je n'ai jamais obtenu de mannite. Aussi, bien que la transformation du sucre en mannite ait été observée par trop d'expérimentateurs pour être révoquée en doute, je crois pouvoir affirmer que les conditions de cette transformation sont jusqu'à présent mal déterminées et n'ont été réalisées qu'accidentellement.

6. *Corps gras.* — On examine également les produits

Digitized by Google

insolubles dans l'eau, principalement pour rechercher s'il y a formation de matières grasses. A cette fin, on traite ces produits par l'éther, lequel dissout les corps gras neutres et les acides gras libres, mais non les sels calcaires formés par ces acides. On analyse le mélange de corps gras neutres et d'acides gras par les procédés que j'ai décrits (*Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XLI, p. 275, et *Journal de Pharmacie*, 3e série, t. XXVII, p. 29). Quant aux sels calcaires, on les décompose par l'acide chlorhydrique bouillant et on agite la liqueur avec de l'éther qui dissout les acides gras devenus libres.

On n'a reconnu aucune formation de corps gras, neutre ou acide. Seulement les substances grasses, qui peuvent préexister dans les matières employées, se retrouvent à la fin des expériences; à peine ont-elles subi un commencement d'acidification.

7. *Sucres.* — Dans le cours de ces travaux, on a souvent examiné et dosé les sucres préexistants, et recherché s'il s'était formé quelque matière sucrée nouvelle. Quatre procédés ont été employés concurremment : l'isolement des sucres en nature, la détermination de leur pouvoir rotatoire, l'essai par le tartrate cupropotassique et l'essai par la levûre de bière; ces trois derniers essais peuvent être qualitatifs ou quantitatifs.

Pour isoler les sucres en nature, on évapore les liqueurs et on en sépare par cristallisation dans l'eau ou dans l'alcool aqueux les divers principes qu'ils renferment. Si l'on opère sur du sucre de lait, ce corps se rencontre parmi les principes cristallisables; tandis que le glucose et les corps analogues se retrouvent à l'état sirupeux dans les dernières eaux mères.

Le tartrate cupropotassique s'applique à la recherche et au dosage du glucose, du sucre de lait, du sucre de canne interverti par les acides, etc.

Ce réactif est très-précieux en raison de son extrême sensibilité, car il accuse le sucre dans une liqueur qui en

Digitized by Google

contient seulement un dix-millième, mais il exige un double contrôle : d'une part, ses indications peuvent être masquées; d'autre part, elles peuvent s'appliquer à des matières autres que le sucre.

Sous le premier rapport, la gélatine et les substances albuminoïdes dissoutes dans la potasse masquent en général la réduction du glucose par le tartrate et redissolvent le protoxyde de cuivre précipité, en développant une teinte violacée, noirâtre ou jaunâtre. Sous l'influence d'une ébullition très-prolongée, surtout si l'on opère en présence d'un excès d'alcali, le protoxyde de cuivre ainsi dissous finit souvent par se reprécipiter. On reconnaît l'absence de matières propres à masquer la réaction, en ajoutant aux liqueurs essayées 1 à 2 dix-milligrammes de glucose et vérifiant que la réduction s'opère sans obstacle. On peut d'ailleurs éliminer la gélatine et les corps analogues en traitant les liqueurs soit par une grande quantité de noir animal, soit, et mieux, par l'acétate de plomb tribasique : on sépare l'excès de ce dernier réactif par le sulfate de soude ou par l'hydrogène sulfuré.

La réduction du tartrate cupropotassique ne s'opère pas seulement par les sucres; sans parler de la réduction spontanée qu'il éprouve s'il ne contient pas un excès d'alcali, il est bon de rappeler que la sorbine, l'eucalyne, certains corps azotés analogues à l'albumine, et diverses autres substances plus ou moins connues le réduisent également. Au contraire, le sucre de canne ne le réduit que s'il a subi l'action des acides ou des ferments.

Aussi est-il nécessaire de contrôler les indications du tartrate par celles que fournit la levûre de bière; ces dernières sont moins sensibles, mais plus assurées. Elles reposent sur la formation de l'acide carbonique et sur celle de l'alcool.

Je crois utile de donner quelques détails sur la reconnaissance de ces deux substances et sur la proportion de sucre qu'elles peuvent accuser.

Digitized by Google

Voici comment on peut opérer pour rechercher la formation de l'acide carbonique. On acidifie très-légèrement par l'acide acétique le liquide suspect, et on opère sur ce liquide, soit dans son état primitif, soit après concentration; on l'introduit avec de la levûre dans un tube fermé par un bout; on achève de remplir le tube avec du mercure et on le retourne dans un vase plein de mercure. On abandonne le tout pendant huit à dix heures dans une étuve chauffée entre 30 et 40 degrés; au bout de ce temps, on constate s'il s'est produit de l'acide carbonique; on le mesure, on l'absorbe par la potasse, pour vérifier s'il n'est pas mêlé avec quelque autre gaz; enfin, s'il est pur, on conclut de son volume la proportion du sucre. Si la liqueur renferme une proportion de sucre inférieure à $\frac{1}{200}$, l'acide carbonique peut demeurer dissous. Mais l'alcool ne s'en forme pas moins.

Dans tous les cas, on répète la fermentation sur la totalité du liquide et on isole l'alcool par des distillations systématiques. Alors même que les liquides renferment seulement quelques dix-millièmes d'alcool, on peut ainsi en reconnaître la présence.

Enfin on vérifie si la liqueur, après avoir subi l'action de la levûre, renferme encore quelque substance apte à réduire le tartrate cupropotassique; si l'on opère sur un poids de sucre inférieur à 1 gramme, dissous dans 10 à 15 grammes d'eau, il doit, en général, disparaître entièrement. D'ailleurs il est bon d'exécuter une expérience comparative avec de la levûre et de l'eau pure, parce que certaines levûres peuvent fournir spontanément de petites quantités d'alcool et d'acide carbonique.

La levûre de bière ne détermine la fermentation du sucre de lait que s'il a subi l'action des acides; elle n'agit ni sur la sorbine, ni sur l'eucalyne; elle n'agit pas sur le glucose contenu dans des solutions concentrées de sels, d'alcool, de glycérine, de gélatine, etc.

Digitized by Google

Dans certains cas, on a cherché dans les liqueurs la présence d'une matière telle que la gomme ou l'amidon, non fermentescible au contact de la levûre, mais transformable en sucre par l'action des acides; cette dernière propriété permet d'avoir recours à l'emploi de la levûre et du tartrate cupropotassique.

8. *Examen microscopique.* — Durant le cours des expériences, on a soumis les liqueurs et les dépôts qui s'y forment à un examen microscopique très-attentif. M. Montagne, dont le nom est classique en pareille matière, a contrôlé à diverses reprises les résultats de cette étude et déterminé les cryptogames qui se développent au sein des liqueurs quand elles subissent le contact de l'air (1); je le prie de vouloir bien accepter ici mes remercîments. Je remplirai le même devoir vis-à-vis de M. Dujardin, lequel a examiné les mêmes liqueurs et a cherché spécialement les infusoires (2). Enfin M. Ch. Robin m'a prêté le concours de sa connaissance approfondie de la structure des tissus employés comme ferments; il a vérifié la conservation ou la destruction plus ou moins complète de leurs éléments anatomiques.

9. *Purification des matières premières. — Mannite.* — La mannite du commerce, même la plus belle, doit être purifiée par cristallisation, car elle contient 1 à 2 centièmes de sucre directement fermentescible au contact de la levûre. Ce sucre vient de la manne, laquelle en renferme 10 à 15 centièmes, contrairement à l'opinion d'un expérimentateur qui paraît en avoir méconnu la préexistence. Presque tous les analystes ont signalé la présence d'un sucre dans la manne; je l'ai vérifiée sur tous les échantillons que j'ai pu me procurer, et notamment sur des produits aussi

(1) *Virgaria nigra; Sporotrichum nigrum* et *aureum* (Fries); *Mycoderma cervisiæ; Leptomitus.....; Botrytis umbellata* (Fries); *Penicillium crustaceum* (Fries), etc.

(2) Ils y sont fort rares : le seul signalé avec certitude est le *Bacterium termo.*

Digitized by Google

frais que possible et d'origine certaine que M. le baron Anca a bien voulu faire venir de Palerme à mon intention. La proportion de ce sucre préexistant dans la manne n'augmente pas sous l'influence du temps ou du séjour dans un lieu obscur et humide. Indépendamment du sucre et de la mannite, la manne renferme près de moitié de son poids de substances à peu près inconnues; aussi l'emploi, dans ces expériences, de la manne ou de la mannite souillée de manne, ne saurait-il conduire à aucune conclusion.

Glycérine. — Il est nécessaire de purifier soi-même la glycérine brute en la traitant par l'oxyde de plomb à 100 degrés pendant huit à dix heures; on élimine par l'hydrogène sulfuré le plomb dissous et on évapore la liqueur jusqu'à ce que sa température s'élève à 160 degrés. La glycérine dite purifiée du commerce renferme une substance apte à réduire le tartrate cupropotassique.

Corps azotés. — L'albumine d'œuf et la caséine contiennent un sucre préexistant; on purifie la deuxième en la délayant dans une grande quantité d'eau et en la lavant par décantation; la première doit être dissoute dans l'eau, précipitée par l'alcool et lavée avec l'alcool aqueux.

Le gluten et la levûre de bière renferment des substances analogues à l'amidon ou à la cellulose et transformables en sucre par l'action des acides ou autrement; on ne peut pas les en débarrasser.

I. — *Fermentation de la mannite.*

La mannite, abandonnée pendant quelques semaines à la température de 40 degrés avec de l'eau, de la craie et du fromage blanc, ou du tissu pancréatique, ou toute autre matière azotée analogue, fournit de l'alcool, avec dégagement d'acide carbonique et d'hydrogène. En même temps se forment de l'acide lactique, de l'acide butyrique et de l'acide acétique.

La proportion relative de ces diverses substances varie

Digitized by Google

extrêmement, suivant les conditions connues ou inconnues de l'expérience; mais, dans tous les cas, l'alcool est le produit principal. Sa quantité varie entre 13 et 33 centièmes du poids de la mannite; dans les circonstances les plus favorables, il résulte de la transformation des deux tiers de la mannite employée. Cet alcool est identique avec l'alcool ordinaire par tous ses caractères, et notamment il peut fournir du gaz oléfiant, C^4H^4 : gaz brûlant avec absorption de 3 volumes d'oxygène et formation de 2 volumes d'acide carbonique, absorbable par le brome, lentement absorbable par l'acide sulfurique au moyen de 3000 secousses par flacon, etc.

La formation de l'alcool, $C^4H^6O^2$, aux dépens de la mannite, $C^6H^7O^6$, s'explique par l'équation suivante :

$$C^6H^7O^6 = C^4H^6O^2 + C^2O^4 + H.$$

On voit que cette formation est corrélative d'un dégagement d'acide carbonique et d'hydrogène; le volume du premier gaz doit être double du volume du second. La production de l'hydrogène distingue la fermentation alcoolique de la mannite de celle des sucres proprement dits.

Quant à la production de l'acide lactique, elle est beaucoup moins abondante que celle de l'alcool; elle en paraît d'ailleurs indépendante, du moins en ce qui concerne l'équation de sa formation. L'acide lactique, $C^6H^6O^6$, ne diffère de la mannite, $C^6H^7O^6$, que par 1 équivalent d'hydrogène :

$$C^6H^7O^6 = C^6H^6O^6 + H.$$

L'acide lactique ainsi formé déplace l'acide carbonique du carbonate de chaux, en présence duquel s'opère la fermentation. Chaque équivalent d'acide lactique met en liberté un équivalent d'acide carbonique, dont le volume est égal à celui de l'hydrogène dégagé simultanément. L'identité de l'acide ainsi produit avec l'acide lactique ne résulte pas seulement de l'examen attentif des caractères de

Digitized by Google

cet acide et de son sel calcaire, mais on a analysé ce dernier corps ; il a fourni :

Eau de cristallisation.	29,5
Chaux.....	17,8

D'après la formule du lactate de chaux ordinaire, $C^6H^5CaO^6 + 5HO$, on aurait dû obtenir :

Eau de cristallisation	29,2
Chaux.....	18,2

Les conditions dans lesquelles l'acide lactique prend naissance aux dépens de la mannite sont les mêmes que celles de la fermentation lactique du sucre.

Dans le premier cas, comme dans le second, de l'acide butyrique, $C^8H^8O^4$, se forme simultanément ou consécutivement. Le plus souvent, ce corps résulte d'une décomposition ultérieure de l'acide lactique, avec dégagement d'acide carbonique et d'hydrogène à volumes égaux :

$$2C^6H^6O^6 = C^8H^8O^4 + 4CO^2 + 4H \quad (1).$$

L'acide butyrique ainsi produit exige 1 équivalent de carbonate de chaux pour sa saturation ; par suite, le rapport des deux gaz devient celui de 5 volumes d'acide carbonique pour 4 volumes d'hydrogène.

Quant à l'acide acétique, il est dû, soit à l'oxydation secondaire de l'alcool, soit, et plutôt, à la décomposition de l'acide lactique ; car la formation de l'acide butyrique par fermentation est toujours accompagnée par celle de l'acide acétique. L'acide butyrique et l'acide acétique ne se développent qu'en proportion très-faible dans la fermentation de la mannite.

Dans les expériences dont je signale les résultats, il n'y a formation ni de sucre, ni de glycérine, ni de corps gras, ni de levûre de bière.

---

(1) Voyez Pelouze et Gélis, *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, tome X, page 434 (1844).

Digitized by Google

Voici le détail de quelques-unes des expériences.

1. 50 grammes de mannite dissous dans 800 grammes d'eau ont été mélangés avec 50 grammes de craie et 20 grammes de fromage mou (représentant 5 grammes de matière sèche). On a maintenu le tout à une température voisine de 40 degrés, du 18 décembre 1855 au 2 mai 1856 (quatre mois et demi); l'étuve n'était chauffée que pendant le jour. Au bout de deux semaines, le dégagement des gaz était en pleine activité.

Le 12 février (deux mois), on examine la moitié de la liqueur; elle contient 6 grammes d'alcool (24 centièmes du poids de la mannite), du lactate de chaux, du butyrate de chaux et de la mannite non décomposée : elle ne renferme pas de sucre proprement dit.

Le 2 mai (quatre mois et demi), l'autre moitié de la liqueur contient $7^{gr},5$ d'alcool (30 centièmes du poids de la mannite), du lactate de chaux, du butyrate de chaux, de la mannite non décomposée, mais point de glycérine. Les matières insolubles dans l'eau renferment seulement une petite quantité de corps gras, en partie acides (sous forme de sels calcaires); leur poids correspond à celui des corps gras préexistant dans le fromage.

On voit que la formation de l'alcool est graduelle, et augmente encore, même après deux mois de fermentation; d'ailleurs la destruction de la mannite, même après quatre mois et demi, n'est pas encore complète.

2. 25 grammes de mannite, 400 grammes d'eau, 25 grammes de craie, 10 grammes de fromage mou. Du 18 février au 9 avril 1856 (sept semaines), mêmes conditions que précédemment.

Digitized by Google

On a obtenu :

Mannite non décomposée. .	8,2
Alcool.....	5,0
Acide butyrique.....	0,6
Acide acétique	0,5
	14,3
Acide carbonique et hydrogène correspondants à l'alcool, calculés.....	4,9
	19,2
Acide lactique et perte.....	5,8
	25,0

On voit que l'alcool s'élève à près de 30 centièmes du poids de la mannite disparue.

La liqueur, examinée à diverses époques, n'a contenu, durant l'expérience, ni sucre, ni globules de levûre. Pas de glycérine.

3. Mêmes proportions. Du 10 décembre 1856 au 20 février 1857 (deux mois et demi). Le mélange est maintenu dans une cave, à la température à peu près constante de 10 degrés. Il se forme une grande quantité d'alcool, mais pas de sucre.

4. Mêmes proportions; mêmes conditions que le n° 1 ; seulement le fromage employé avait été délayé à plusieurs reprises dans une grande quantité d'eau, et lavé par décantation, pour le débarrasser des matières solubles.

Du 18 février au 10 mai 1856 (deux mois et demi). On obtient 20 centièmes d'alcool, il ne se forme ni sucre ni globules de levûre.

5. Mêmes proportions et mêmes conditions que le n° 4. Le fromage, privé de matières solubles dans l'eau, a été traité encore humide par l'éther pour éliminer les corps gras; puis on a chassé l'éther sous l'influence d'une douce chaleur. Du 18 février au 11 avril 1856 (sept semaines).

Digitized by Google

On a obtenu, sur 100 parties de mannite :

Mannite non décomposée...	8
Alcool.	32 (1)
Acide lactique.	20
Acide butyrique.....	4
Acide acétique.	2
Substance soluble dans l'alcool absolu.....	2
Corps gras.	0,1 (2)
	68,0
Acide carbonique et hydrogène correspondants à l'alcool, calculés.....	31
	99,0

Pas de sucre formé durant l'expérience.

Cette analyse prouve qu'il ne forme aucun produit essentiel autre que les corps signalés plus haut. Son exactitude est du reste moins grande que les nombres précédents ne sembleraient l'indiquer, car une portion du fromage employé a dû contribuer à la formation des produits, principalement à celle de l'acide butyrique. Le poids total de ce fromage (supposé sec) s'élevait à 5 centièmes du poids de la mannite.

6. 10grammes de mannite, 120grammes d'eau, 10grammes de craie, 2 grammes de fromage mou, mêmes conditions que le n° 1. Du 29 mars au 2 juin 1856 (deux mois).

Cette expérience a pour objet essentiel la détermination des gaz.

On a recueilli les gaz sur le mercure ; ils ont été mesurés à une température voisine en général de 10 degrés.

Il est nécessaire que pendant les expériences le mercure

(1) 35 centièmes du poids de la mannite disparue.

(2) Cette trace de corps gras provient sans doute de l'épuisement incomplet du fromage.

Digitized by Google

ne pénètre pas dans les flacons : la fermentation pourrait être arrêtée par cette circonstance.

Commencement de l'expérience, 29 mars.

La fermentation commence le 5 avril.

	Volume non corrigé.
5 avril, il se dégage..	23 cent. cubes.
6.....	24
7.....	86
8.....	83
10. (2 jours).....	80
11.....	81
14. (3 jours).....	157
15.....	36
16.....	69
17.....	42
18.....	90
28. (10 jours).....	950
6 mai. (8 jours)....	122
15. (9 jours).....	91
2 juin. (18 jours)...	92
	2026

Ces 2026 centimètres cubes renferment :

Acide carbonique..	1309
Hydrogène.... ..	643
Azote.....	74
	2026

Ces gaz réduits à 0 et à $0^{m},76$ pèsent :

	gr
Acide carbonique...	2,531
Hydrogène.....	0,056
	2,587
Azote..	0,088

Digitized by Google

Le fromage employé renfermait sur 100 parties :

Matière séchée à 100 degrés..	33
Eau.....	67
	100
Corps gras.....	10
Matière soluble dans l'eau. ..	3
Azote.....	4,2

D'après le dernier chiffre, 2 grammes de fromage, poids employé dans l'expérience précédente, renfermaient 0,084 d'azote.

Le poids de l'alcool obtenu était un peu inférieur au tiers du poids de la mannite.

J'indiquerai plus loin quelles conclusions on peut tirer de ces résultats numériques.

A la fin de l'expérience, on a examiné la matière insoluble dans l'eau, mais on n'a réussi à en extraire aucun produit défini, si ce n'est un acide gras analogue à l'acide margarique.

7. 1 gramme de mannite, 12 grammes d'eau, 2 grammes de craie, $0^{gr},2$ de fromage.

Cette expérience a été simultanée avec la précédente et destinée au même objet.

On a obtenu :

Jusqu'au 7 avril..	30^{cc} de gaz.
8.....	12,5
11.....	38,5
18.....	21,0
28 avril .	90,0
15 mai..	5,0
27.....	3,0
	200,0

Ces gaz renferment :

Acide carbonique.	116^{cc},	dont le poids égale	0,224
Hydrogène.....	76	»	0,007
			0,231
Azote.....	8	»	0,009
	200		

Digitized by Google

Le poids de la chaux contenue dans la dissolution a été déterminé ; il correspond à $0^{gr},350$ de lactate de chaux (mêlé probablement de butyrate et d'acétate).

D'après les deux expériences qui précèdent, la nature et le volume des gaz dégagés répondent à l'interprétation que j'ai donnée à la fermentation alcoolique de la mannite. Ces gaz sont de l'acide carbonique et de l'hydrogène, conformément à l'équation

$$C^6H^7O^6 = C^4H^6O^2 + 2CO^2 + H;$$

leur rapport est sensiblement celui de 2 volumes d'acide carbonique pour 1 volume d'hydrogène dans la première expérience ; ce rapport correspond à cette même fermentation alcoolique, ainsi que la proportion d'alcool obtenue.

Dans la deuxième expérience, le volume total des gaz est presque le même que dans la première ; mais le volume de l'hydrogène surpasse sensiblement la moitié du volume de l'acide carbonique : ceci indique une fermentation lactique ou butyrique simultanée, car dans ces deux fermentations la proportion de l'acide carbonique relativement à l'hydrogène est plus faible que dans la fermentation alcoolique. Cette conclusion est corroborée par la formation d'un sel de chaux soluble. Toutefois, même dans ce cas, la proportion relative des deux gaz indique que la fermentation alcoolique doit être le phénomène principal.

La marche de la fermentation est indiquée par les volumes des gaz dégagés successivement. D'après la première expérience, on voit que la décomposition commence au bout d'une semaine ; elle s'accélère bientôt, présente pendant trois semaines une vitesse à peu près constante, puis elle se ralentit et se prolonge pendant plusieurs semaines sans arriver à une terminaison nettement définie.

Dans ces expériences, une petite partie des gaz résulte probablement de la décomposition du fromage lui-même. Cet effet, que l'on ne peut éliminer, ne saurait être qu'une

Digitized by Google

fraction du phénomène principal, car le poids du fromage (supposé sec) ne monte qu'à 6 pour 100 du poids de la mannite.

Cette décomposition simultanée du fromage est attestée par un phénomène très-caractéristique : les gaz dégagés renferment de l'azote dont la proportion est sensiblement égale à celle de l'azote contenu dans la matière azotée. Toutefois le volume de l'azote dégagé est probablement estimé un peu trop haut, car toutes les erreurs des expériences tendent à s'accumuler sur ce résidu gazeux. Je reviendrai sur les conséquences d'un tel dégagement d'azote libre.

8. En même temps que les deux expériences précédentes et dans les mêmes conditions, ont été faites diverses vérifications.

(*a*) On a disposé une fermentation semblable dont les produits ont été soumis presque tous les jours à l'examen microscopique ; il ne s'est formé ni levûre ni sucre. M. Montagne a bien voulu vérifier le premier point pendant la durée de l'expérience. Après sept jours, la liqueur renfermait déjà de l'alcool ; à la fin, elle en contenait un poids égal aux 20 centièmes de la mannite employée.

(*b*) 10 grammes de mannite ont été dissous dans 120 grammes d'eau et mélangés avec 10 grammes de craie. A la fin de l'expérience, on a retrouvé la mannite inaltérée. Il en a été de même de la mannite dissoute simplement dans l'eau.

(*c*) 25 grammes de mannite ont été dissous dans 400 grammes d'eau et mélangés avec 5 grammes de fromage lavé (1). Il ne s'est pas formé de sucre. A la fin de l'expérience, on a pu isoler par cristallisation $24^{gr},2$ de mannite, c'est-à-dire sensiblement la quantité primitive.

(*d*) Le fromage lavé, puis abandonné avec de la craie et de l'eau, n'a pas fourni d'alcool.

Abandonné sans craie pendant quelques mois, il n'a pas

(1) Il est nécessaire de laver le fromage blanc pour le débarrasser d'un peu de sucre de lait qu'il retient en raison de son origine.

Digitized by Google

fourni d'alcool : la proportion de matière grasse qu'il contenait n'a pas augmenté.

(*e*) Une partie d'alcool dissoute dans 10 parties d'eau, abandonnée à elle-même ou mélangée avec de la craie et diverses matières azotées (fromage, pancréas, testicule), dans des flacons remplis, mais mal bouchés, s'est à peine altérée et n'a fourni ni acide acétique, ni sel calcaire soluble, en proportion notable.

(*f*) Le lactate de chaux, le lactate de magnésie et le butyrate de chaux, dissous séparément dans l'eau et mélangés avec de la craie et du fromage, n'ont pas fourni d'alcool. Toutes ces expériences ont été faites dans les mêmes conditions de temps et de température que ci-dessus. Ces résultats, joints à ceux qui précèdent, prouvent que l'alcool produit résulte de la transformation directe de la mannite elle-même, transformation qui exige le concours du fromage et de la craie pour se manifester.

Le fromage peut d'ailleurs être remplacé par toute autre matière azotée de nature animale, comme il va être dit.

9. En effet, sans modifier les proportions de mannite, d'eau et de carbonate de chaux, j'ai remplacé le fromage par un même poids des corps suivants : gélatine, fibrine desséchée et conservée depuis plus de quinze ans; levûre de bière desséchée et conservée depuis plus de quinze ans; blanc d'œuf; jaune d'œuf; gluten granulé du commerce; tissu pancréatique, brut et lavé; tissu hépatique; rate; rein; testicule; vessie; intestin grêle; gros intestin; muscle de la cuisse; poumon; cerveau; glande sous-maxillaire; peau; sang (1).

Ces matières si diverses ont presque toutes provoqué la fermentation alcoolique de la mannite. Voici le tableau des quantités d'alcool obtenu.

100 de mannite, 100 de craie, 1200 d'eau, et 20 parties de substance azotée ont fourni :

(1) Les dernières substances provenaient d'un chien.

Digitized by Google

SUBSTANCES.	ALCOOL.	OBSERVATIONS.	DURÉE DE L'EXPÉRIENCE.
Gélatine	13	Pas de sucre.	Du 5 au 22 juin 1856.
Fibrine desséchée	22	Odeur désagréable; pas de sucre	Id.
Levûre desséchée	26	Odeur d'éther butyrique; pas de sucre	Id.
Blanc d'œuf	0	La mannite recristallise; pas de sucre	Id.
Jaune d'œuf	15	» Id	Id.
Gluten granulé	?	» ?	Id.
Tissu pancréatique brut	Très-abondant.	Du lactate de chaux; pas de sucre	Du 8 au 26 mai 1856.
Id	20	Odeur désagréable; pas de sucre	Du 5 au 22 juin 1856.
Tissu pancréatique lavé	30	Du lactate de chaux; pas de sucre	Du 8 au 26 mai 1856.
Tissu hépatique	Abondant.	Odeur d'éther butyrique; pas de sucre	Du 5 au 22 juin 1856.
Rate	20	» Id	Id.
Rein	18	Odeur d'éther butyrique; pas de sucre	Id.
Testicule	16	Id Id	Id.
Vessie	Abondant.	Id Id	Id.
Intestin grêle	Très-peu abondant.	» Id	Id.
Gros intestin	17	» Id	Id.
Muscle de la cuisse	19	Odeur d'éther butyrique; pas de sucre	Id.
Poumon	22	Id Id	Id.
Cerveau	24	» Id	Id.
Glande sous-maxillaire	16	» Id	Id.
Peau garnie de poils	22	Odeur d'éther butyrique, pas de sucre	Id.
Sang	13	Pas de sel calcaire soluble; ?	Id.

Digitized by Google

Aucune matière en dehors de la classe précédente ne paraît apte à provoquer la fermentation alcoolique de la mannite; du moins je n'ai obtenu aucun résultat avec les corps suivants substitués à la caséine : nitrate d'ammoniaque, cyanure de potassium, cyanure jaune, cyanure rouge, bleu de Prusse, solution aqueuse saturée de cyanogène, urée, acide urique, oxamide, butyramide, tartrate d'ammoniaque, thiosinnamine, nitronaphthaline, chlorisatine, indigo, tournesol en pains, morphine, sulfate de morphine, quinine, sulfate de quinine, amygdaline, salicine.

Le succès des expériences exécutées avec les matières animales les plus diverses prouve que la fermentation alcoolique de la mannite ne résulte pas de l'action d'une substance spéciale, déterminée par sa forme ou par son origine. Les expériences avec la gélatine sont surtout caractéristiques, parce que cette matière est artificielle et privée de toute forme définie. Dans ces expériences, d'ailleurs, aucun produit organisé ne prend naissance, pourvu que l'on évite le contact de l'air atmosphérique.

II. — *Fermentation de la glycérine.*

La glycérine abandonnée pendant quelques semaines à la température de 40 degrés avec de l'eau, de la craie et du fromage blanc, fournit une certaine quantité d'alcool dont la formation est accompagnée d'un dégagement gazeux.

La proportion de cet alcool est beaucoup moindre que si l'on opère avec la mannite; souvent très-faible, elle n'a jamais dépassé le dixième du poids de la glycérine, ce qui répond à la transformation du cinquième du poids de cette substance. La plus grande partie de la glycérine demeure inaltérée. Un phénomène analogue, mais beaucoup moins prononcé, a été signalé plus haut dans la fermentation de la mannite; une portion de ce corps se retrouve sans altération à la fin des expériences. Probablement le corps azoté traverse toute la période durant laquelle il joue le rôle de

Digitized by Google

ferment, avant que la totalité de la matière sucrée ait pu subir la fermentation ; la glycérine, beaucoup plus stable que la mannite, se décompose moins complétement.

L'alcool ainsi formé aux dépens de la glycérine est identique avec l'alcool ordinaire par tous ses caractères, et notamment par celle de fournir du gaz oléfiant, C^4H^4, gaz brûlant avec absorption de 3 volumes d'oxygène et formation de 2 volumes d'acide carbonique, absorbable par le brome, lentement absorbable par l'acide sulfurique concentré au moyen de 3000 secousses par flacon, etc.

La formation de l'alcool, $C^4H^6O^2$, aux dépens de la glycérine, $C^6H^8O^6$, peut s'expliquer par l'équation suivante :

$$C^6H^8O^6 = C^4H^6O^2 + C^2O^4 + H^2.$$

La production simultanée de l'acide lactique n'a pu être constatée d'une manière certaine ; on a seulement reconnu celle d'un peu d'acide butyrique. On n'a observé ni formation de sucre proprement dit, ni développement de levûre, ni production de corps gras.

Voici le détail de quelques expériences.

1. 50 grammes de glycérine, 50 de craie, 20 de fromage mou, 800 d'eau. Du 18 décembre 1855 au 5 mai 1856 (quatre mois et demi).

On a obtenu une petite quantité d'alcool et un peu d'acide butyrique (en partie préexistant dans le fromage). Il ne s'est pas formé de sucre. Les corps gras, isolés à la fin de l'expérience n'avaient pas augmenté de proportion ; ils étaient formés principalement par des matières neutres mélangées avec quelques centièmes d'acides gras : ceci prouve que dans les conditions de l'expérience, la matière azotée ne provoque que fort peu l'acidification du corps gras neutre primitif.

2. 10 grammes de glycérine, 10 de craie, 2 de fromage, 120 d'eau. Du 9 avril 1856 au 5 mai (un mois). Le déga-

Digitized by Google

gement gazeux commence lentement après le huitième jour; ni globules de levûre, ni sucre ; alcool douteux.

3. 50 grammes de glycérine, 50 de craie, 17 de fromage lavé (représentant 4 grammes de matière sèche), 400 d'eau. Du 2 mai au 22 juin 1856 (sept semaines). Il se forme 5 grammes d'alcool; ni globules de levûre, ni sucre.

4. 25 grammes de glycérine, 25 de craie, 8 de tissu du pancréas, 250 d'eau. Du 2 mai au 22 mai 1856 (sept semaines). Il se forme de l'alcool; ni acide butyrique sensible, ni globules de levûre, ni sucre.

III. — *Fermentation de la dulcine.*

La dulcine présente la même composition que la mannite; l'histoire chimique de ces deux corps et des composés auxquels ils donnent naissance présente la plus frappante analogie; aussi la dulcine, la mannite me paraissent-elles devoir être représentées par la même formule, conformément à l'opinion émise par Gerhardt. Elles se distinguent par leur forme cristalline et par la propriété, spéciale à la dulcine, de fournir de l'acide mucique quand on l'oxyde par l'acide azotique. Ni la dulcine, ni la mannite ne sont changées en sucre par l'action de l'acide sulfurique.

La dulcine abandonnée pendant quelques semaines à la température de 40 degrés, avec de l'eau, de la craie et du fromage blanc fournit de l'alcool, de l'acide lactique et de l'acide butyrique. La proportion de ces divers produits est d'ordinaire plus faible que si l'on opère avec la mannite, mais beaucoup plus considérable que si l'on opère avec la glycérine. Une grande partie de la dulcine demeure inaltérée.

Le poids de l'alcool formé varie beaucoup; il s'est élevé au maximum jusqu'à 18 centièmes du poids de la dulcine employée, ou plus exactement jusqu'à 25 centièmes du poids de la dulcine disparue.

Cet alcool est identique avec l'alcool ordinaire par tous

Digitized by Google

ses caractères ; il fournit du gaz oléfiant, C^4H^4 : gaz brûlant avec absorption de 3 volumes d'oxygène et formation de 2 volumes d'acide carbonique, absorbable par le brome, lentement absorbable par l'acide sulfurique concentré au moyen de 3000 secousses par flacon, etc. Il était fort important de constater l'identité de l'alcool ordinaire avec cet alcool formé par la dulcine, en raison des diverses formules proposées pour représenter la dulcine, et notamment de celle de Laurent, qui regardait ce corps comme un homologue du sucre de raisin.

La formation de l'alcool, $C^4H^6O^2$, aux dépens de la dulcine, $C^8H^7O^6$, peut s'exprimer par l'équation employée pour la mannite :

$$C^8H^7O^6 = C^4H^6O^2 + C^2O^4 + H.$$

La formation des acides lactique et butyrique s'exprime également par les équations indiquées à l'occasion de la mannite.

La séparation des sels de chaux de ces acides est plus difficile que dans les expériences relatives à la mannite.

On n'a observé ni formation de sucre proprement dit ou de glycérine, ni développement de levûre, dans ces expériences.

Voici le détail de quelques-unes.

1. 50 grammes de dulcine, 50 de craie, 20 de fromage, 800 d'eau. Du 25 janvier au 9 avril 1856 (deux mois et demi).

On a obtenu :

Dulcine non décomposée (en partie non dissoute).	12,0
Alcool.	1,4
Butyrate de chaux impur.	5,7
Lactate de chaux impur.	8,0
Sel calcaire non déterminé.	8,0
	35,1
Gaz, perte, etc.	14,9

Il ne s'est pas formé de sucre ; les corps gras préexistant

Digitized by Google

dans le fromage n'ont pas augmenté, un sixième seulement s'est acidifié.

2. 10 grammes de dulcine, 10 de craie, 120 d'eau, 2 de fromage. Du 9 avril au 25 mai 1856 (six semaines).

On a obtenu : 1 gramme d'alcool (10 centièmes), de la dulcine non décomposée, du lactate de chaux et du butyrate de chaux. Il ne s'est formé ni glycérine, ni sucre.

3. 10 grammes de dulcine, 10 de craie, 120 d'eau, 2 de pancréas. Du 8 mai au 27 mai (dix-neuf jours).

On a obtenu : $1^{gr},8$ d'alcool (18 centièmes). Pas de globules de levûre.

4. 10 grammes de dulcine, 10 de craie, 120 d'eau, 2 de pancréas. Du 8 mai au 27 mai (dix-neuf jours).

On a obtenu :

Dulcine non décomposée..	1,7
Alcool.	1,6
Lactate de chaux.....	»

La proportion de l'alcool s'élève à 20 centièmes du poids de la dulcine disparue.

IV. — *Fermentation de la sorbine.*

La sorbine (1) présente la même composition que le glucose, et à peu près les mêmes réactions et la même stabilité; mais elle s'en distingue parce que la levûre de bière, avec ou sans traitement acide, ne la détermine point à la fermentation alcoolique. Cette fermentation peut être provoquée dans les mêmes conditions que celle de la mannite, de la glycérine, etc., mais d'une manière moins constante et avec plus de difficultés. Elle se représente par la même formule que la fermentation alcoolique du sucre :

$$C^6 H^6 O^6 = C^4 H^6 O^2 + C^2 O^4.$$

Au contraire, la sorbine est éminemment apte à se chan-

(1) Je dois cette sorbine à l'obligeance de M. Boutron.

Digitized by Google

ger en acide lactique : aucun autre corps sucré ne présente cette propriété d'une manière si complète ; la réaction s'opère parfois poids pour poids et présente dès lors le caractère essentiel d'une transformation isomérique. Toutefois, le plus souvent, une portion de la sorbine se change en alcool, la partie principale en acide lactique, et une portion se retrouve sans altération. Dans le cours de l'expérience, la sorbine ne se change pas en sucre proprement dit, fermentescible au contact de la levûre.

1. 10 grammes de sorbine, 120 d'eau, 10 de craie, 2 de fromage. Du 25 janvier 1856 au 5 mai (près de quatre mois) à 40 degrés.

On obtient de l'alcool, du lactate de chaux, du butyrate de chaux, un peu de sorbine inaltérée.

2. Expérience semblable. Du 18 février au 11 avril 1856 (deux mois).

Ni alcool, ni sucre, ni acide butyrique. La sorbine est entièrement détruite.

On obtient $11^{gr},2$ de lactate de chaux cristallisé, ce qui répond sensiblement au poids de la sorbine employée.

3. 10 grammes de sorbine, 120 d'eau, 10 de craie, 3 de pancréas. Du 18 mai au 16 juin 1856 (un mois).

On obtient de l'alcool, du lactate de chaux et de la sorbine inaltérée.

V. — *Fermentation du sucre de canne et du glucose.*

On sait que ces deux substances abandonnées avec de la craie et du fromage fournissent successivement de l'acide lactique et de l'acide butyrique ; on sait également que les sucres proprement dits, maintenus en contact avec les matières azotées d'origine animale, peuvent produire de l'alcool. Mais cette formation s'opère plus facilement et en plus grande abondance dans des conditions identiques à celles précédemment décrites, c'est-à-dire sous l'influence d'un mélange de craie et de fromage, et à la

Digitized by Google

température de 40 degrés. La craie exerce sur la production de l'alcool une influence très-favorable. On peut la remplacer par diverses substances qui jouissent de même de la propriété de neutraliser les acides. Dans tous les cas, la proportion de l'alcool est beaucoup plus faible que si l'on opère avec la mannite, tandis que celle des acides lactique et butyrique est tout à fait prédominante. Au bout d'un temps suffisant, le sucre disparaît complétement.

Comme contrôle, on a répété les mêmes expériences en opérant avec la levûre et le glucose en présence des mêmes substances, salines et autres. Voici comment on opère : On met dans un tube 2 centimètres cubes d'une solution de glucose au $\frac{1}{10}$, on y ajoute quelques centigrammes de levûre, ainsi que la substance à essayer; on achève de remplir le tube avec du mercure et on le retourne sur ce même liquide. On le maintient à 30 degrés environ pendant vingt-quatre heures, puis on examine s'il s'est formé de l'acide carbonique pur, quel en est le volume, et si la liqueur réduit encore le tartrate cupropotassique.

Au besoin, on répète les essais en opérant sur 15 à 20 grammes de glucose et en distillant pour recueillir l'alcool. Avec cette dernière proportion de sucre, la fermentation n'est jamais complète: toujours il reste quelque trace de glucose non altéré. Le glucose employé doit être exempt d'alcool, ce qui n'arrive pas toujours. Dans le cas où l'on opère avec la levûre, en présence des sels solubles, il est nécessaire d'employer des solutions étendues, car l'action de la levûre est arrêtée par l'emploi d'une solution très-concentrée d'une substance quelconque : chlorures alcalins, gélatine, glycérine, sucre lui-même.

Dans les expériences faites avec les sucres et une matière azotée, si l'on opère au contact de l'air, on ne tarde pas à voir apparaître des globules de levûre de bière, phénomène que ne présentent ni la mannite, ni la glycérine. Mais si l'air est exclu, la formation de ces globules n'a pas lieu.

Digitized by Google

Dans d'autres conditions, les dissolutions de sucre abandonnées au contact de l'air peuvent ne pas fournir d'alcool et cependant se remplir de globules analogues à ceux de la levûre de bière, mais privés de la propriété d'exciter la fermentation alcoolique. Dans ces circonstances, la présence d'êtres organisés dans une liqueur sucrée et la transformation de cette liqueur en alcool sont donc deux phénomènes indépendants : tantôt ils coïncident, tantôt on les observe séparément.

Dans les conditions précédentes, il n'y a pas formation de corps gras.

Si l'on introduit dans les liqueurs, pendant les expériences, des sulfates ou des sulfites alcalins ou terreux, ils ne se changent pas en sulfures. Les sels ammoniacaux, avec le contact de l'air, ne se sont pas changés en nitrates.

Je n'ai pas davantage réussi à constater la formation de la mannite, bien que divers auteurs l'aient annoncée comme à peu près constante dans les conditions de la fermentation lactique. J'ai opéré tantôt à une basse température, de façon à provoquer momentanément la fermentation visqueuse, tantôt à la température de 40 degrés ; tantôt avec de petites quantités, tantôt avec de très-grandes quantités de matières ; tantôt en présence de sels minéraux très-divers, solubles et insolubles, tantôt en présence d'essences, de liquides volatils, de matières azotées variables ; j'ai examiné les produits à diverses époques de l'expérience : jamais je n'ai obtenu de mannite.

Voici quelques-unes des expériences. Plusieurs des résultats auxquels elles ont conduit doivent être regardés comme spéciaux aux conditions dans lesquelles je me suis placé, et que j'indique autant que possible avec détail.

1. 10 grammes de sucre de canne, 120 d'eau, 10 de craie, 2 de fromage. Du 9 avril au 27 mai 1856 (six semaines). Température : 40 degrés.

On a obtenu $1^{gr},2$ d'alcool (12 centièmes).

Digitized by Google

La liqueur renferme du lactate de chaux, des globules de levûre, et environ 3 grammes de sucre modifié.

A une basse température, la fermentation est plus lente et fournit moins d'alcool.

2. 170 grammes de sucre de canne, 2 litres d'eau, 200 grammes de craie, 200 de fromage. Du 15 décembre 1855 au 18 février 1856 (deux mois). On opère à une température voisine de zéro.

Le 13 janvier, la masse est en pleine fermentation visqueuse; elle renferme de l'alcool. Le 16 février, tout le sucre a disparu. On obtient 10 grammes d'alcool (6 centièmes), du lactate de chaux, fort peu de butyrate, nulle trace de mannite.

3. 50 grammes de glucose, 800 d'eau, 50 de craie, 20 de fromage. Du 18 décembre 1855 au 11 mai 1856 (cinq mois). A la température ordinaire.

Le 29 février, la liqueur renferme de l'alcool, du lactate de chaux et du glucose. Le 11 mai, le sucre et le lactate de chaux ont disparu. On trouve 1 gramme d'alcool (2 centièmes), et du butyrate de chaux.

4. Dans une expérience faite sur 25 kilogrammes de glucose et exécutée en vue de la production de l'acide butyrique, on a séparé le butyrate de chaux par cristallisation et obtenu finalement des eaux mères dont le volume ne s'élevait qu'à 100 centimètres cubes. On n'a pas réussi à en extraire de mannite.

5. Les expériences suivantes ont été exécutées avec la caséine en présence de divers liquides insolubles dans l'eau.

En présence du sulfure de carbone, le sucre n'a formé ni alcool, ni sel de chaux soluble, et n'a pas paru se détruire.

Cependant l'eau saturée de la vapeur de cette substance n'empêche pas l'action de la levûre sur le glucose, du moins complétement.

En présence de l'essence de térébenthine, on a obtenu près de 2 centièmes d'alcool, mais point de sel de chaux

Digitized by Google

soluble. Cette même essence ne s'oppose pas d'une manière absolue à l'action de la levûre sur le sucre.

La présence de l'huile, avec ou sans craie, ne s'oppose pas à la formation de l'alcool (8 centièmes), ni à celle du lactate de chaux; il ne se forme pas de mannite; à peine si l'huile éprouve une légère acidification.

6. Les expériences suivantes établissent l'utilité du carbonate de chaux et des corps propres à jouer un rôle analogue. Elles renferment diverses observations relatives à la formation de la levûre et des substances analogues.

50 grammes de glucose, 800 d'eau, 20 de fromage, 50 de sulfate de chaux. Du 18 décembre 1855 au 12 mai 1856. Pas d'alcool sensible; la liqueur renferme une multitude de globules semblables à ceux de la levûre de bière.

Le 2 juin, on ajoute 50 grammes de craie et 20 de fromage. Le 22 juin, le glucose a disparu; la liqueur ne renferme pas de sulfure. Elle contient 7 grammes d'alcool (14 centièmes), du lactate de chaux, du butyrate de chaux, point de mannite.

L'expérience précédente montre l'efficacité du carbonate de chaux. Du reste cette efficacité est surtout manifeste en ce qui concerne la destruction totale du sucre; mais la présence de la craie n'est pas absolument indispensable à la formation de l'alcool. On peut d'ailleurs remplacer le carbonate de chaux par divers autres corps doués des mêmes propriétés neutralisantes.

Voici le résumé des résultats obtenus conformément à cette dernière considération.

On a employé 100 parties de glucose, 1000 d'eau, 20 de fromage et 100 du corps neutralisant.

A. *Substances insolubles.*

(*a*) *Sous-carbonate de magnésie.* — Du 18 décembre 1855 au 8 mai 1856 (près de cinq mois). On obtient 8 centièmes d'alcool, du lactate de magnésie, un peu de butyrate,

Digitized by Google

pas de mannite. Levûre probable. Le sucre est entièrement détruit.

Le sous-carbonate de magnésie n'empêche pas l'action de la levûre de bière sur le glucose, mais il absorbe une partie de l'acide carbonique formé.

(*b*) *Carbonate de baryte.* — Mêmes conditions. On obtient 3 parties d'alcool, du lactate de baryte incristallisable renfermant du butyrate ; pas de mannite. Levûre douteuse. Le carbonate de baryte n'empêche pas l'action de la levûre de bière sur le glucose.

3. *Carbonate de manganèse.* — Mêmes conditions. Du 15 avril au 27 mai 1856. 10 parties d'alcool. La liqueur renferme encore le sixième du glucose primitif. Elle contient du manganèse en dissolution.

Le carbonate de manganèse n'empêche pas l'action de la levûre sur le sucre. Le sulfate de manganèse, sel soluble, ne l'empêche pas davantage, du moins complétement.

(*c*) *Carbonate de zinc.* — Mêmes conditions. 10 parties d'alcool. La liqueur contient du glucose et du zinc dissous. Le carbonate de zinc n'empêche pas l'action de la levûre sur le glucose ; l'acétate de zinc et le sulfate de zinc, sels solubles, ne l'empêchent pas davantage, du moins complétement.

(*d*) *Carbonate de fer naturel.* — Mêmes conditions. Il se forme de l'alcool. La liqueur contient du glucose et du fer dissous.

Le carbonate de fer n'empêche pas l'action de la levûre sur le glucose ; mais la liqueur précédente s'y oppose partiellement. Du reste les sels de fer solubles agissent d'une manière analogue, car la levûre change partiellement le glucose en alcool en présence du sulfate de protoxyde de fer, ou d'un mélange de sulfate de sesquioxyde et d'acétate de soude ; mais le sulfate de sesquioxyde pur empêche entièrement l'action de la levûre. On employait 3 parties de sel pour 10 de glucose.

Digitized by Google

(*e*) *Carbonate de nickel.* — Mêmes conditions. 1 centième d'alcool environ. La liqueur renferme du glucose et du nickel dissous.

Le carbonate de nickel n'empêche pas l'action de la levûre sur le glucose.

(*f*) *Carbonate de cuivre.* — Mêmes conditions. Pas d'alcool; pas de cuivre dissous. La liqueur renferme du glucose.

Le carbonate de cuivre empêche presque entièrement l'action de la levûre sur le glucose. Le sulfate et l'acétate de cuivre, sels solubles, l'empêchent entièrement.

(*g*) *Carbonate de plomb.* — Mêmes conditions. Plus de 10 parties d'alcool. La liqueur renferme du glucose et du plomb dissous.

Dans une autre expérience faite à une température plus basse (du 18 décembre 1855 au 8 mai 1856), on a obtenu 4 parties d'alcool, et la liqueur ne renfermait pas de plomb dissous.

Le carbonate de plomb n'empêche pas l'action de la levûre sur le glucose, du moins complétement. L'acétate de plomb, sel soluble, l'empêche presque entièrement; cependant il se forme une trace d'alcool. Le chlorure de plomb ne l'empêche pas entièrement.

(*h*) *Oxyde de zinc.* — Mêmes conditions que précédemment. La liqueur renferme de l'alcool, du zinc et du glucose dissous.

L'oxyde de zinc n'empêche pas l'action de la levûre sur le glucose.

(*i*) *Oxyde de cuivre calciné.* — Mêmes conditions. 5 parties d'alcool. La liqueur renferme du glucose et une trace d'oxyde de cuivre dissous.

L'oxyde de cuivre n'empêche pas l'action de la levûre sur le glucose, mais la liqueur précédente s'y oppose en grande partie.

(*k*) *Oxyde de plomb* (litharge). Mêmes conditions. Pas

Digitized by Google

d'alcool. La liqueur renferme du glucose et du plomb dissous.

La litharge n'empêche pas l'action de la levûre sur le glucose.

(*l*). *Bioxyde de manganèse naturel.* — Mêmes conditions. La liqueur renferme de l'alcool, du sucre et du manganèse dissous.

Le bioxyde de manganèse empêche presque entièrement l'action de la levûre sur le glucose, comme on le sait depuis longtemps.

(*m*) *Fer métallique.* — Mêmes conditions. 8 parties d'alcool. Il s'est formé du sesquioxyde de fer. La liqueur renferme du glucose et du fer dissous.

Le fer n'empêche pas l'action de la levûre sur le sucre.

(*n*) *Zinc métallique.* — Mêmes conditions. 20 parties d'alcool. La liqueur renferme du zinc et un peu de glucose.

Dans les diverses expériences qui précèdent, la formation de l'alcool et la dissolution de l'oxyde métallique ont marché simultanément.

En résumé, dans les conditions que je viens d'indiquer, les substances terreuses et métalliques employées ont concouru à la formation de l'alcool, loin de s'y opposer, à l'exception des sels de cuivre et de plomb ; encore ces derniers ne l'empêchent pas d'une manière absolue.

L'action qu'exerce le bioxyde de manganèse vis-à-vis de la levûre de bière est très-digne de remarque, d'autant plus que ce corps n'empêche pas l'action lente de la caséine.

B. *Substances solubles.*

Les expériences qui suivent sont d'autant plus caractéristiques, qu'elles montrent la fermentation alcoolique du glucose opérée dans un milieu alcalin, contrairement à l'opinion de divers auteurs.

(*a*) *Bicarbonate de potasse.* — Mêmes conditions. Du

Digitized by Google

15 avril au 17 mai 1856 (un mois). Alcool notable. La liqueur renferme encore du sucre.

Une solution de bicarbonate de potasse n'empêche pas l'action de la levûre sur le sucre, du moins complétement.

(*b*) *Carbonate de soude.* — Mêmes conditions. On obtient 8 parties d'alcool. La liqueur renferme encore du sucre.

Dans une autre expérience (du 18 mai au 22 juin 1856), faite à la température ordinaire et au contact de l'air, il s'est formé 7 parties d'alcool; le glucose a disparu presque entièrement. La liqueur renferme un grand nombre d'algues microscopiques, dont une portion colorée d'une teinte verdâtre.

Le carbonate de soude, suivant sa proportion, peut empêcher l'action de la levûre sur le glucose ou ne pas s'y opposer. En effet, si l'on emploie 10 parties de glucose, 100 parties d'eau et 1 partie de carbonate de soude, il se forme de l'alcool; la liqueur renferme encore du sucre et demeure alcaline. Mais si l'on emploie 10 parties de glucose et 5 parties de carbonate de soude, il ne se forme plus d'alcool.

(*c*) *Carbonate d'ammoniaque.* — Mêmes conditions. Du 18 décembre 1855 au 8 mai 1856. On obtient près de 4 parties d'alcool. Le sucre est entièrement détruit. Ni globules, ni glycérine, ni azotate. Après distillation, on a traité la liqueur par la chaux, évaporé, repris par l'eau, concentré, précipité par l'alcool. Au lieu de lactate de chaux, on a obtenu un sel particulier, très-hygrométrique. Ce sel, desséché à 110 degrés, renfermait

C (total)..	36,6
H.....	5,2
Ca O. ...	18,9

Ces nombres sont voisins de la formule

$$C^{18} H^{14} Ca^{2} O^{16},$$

Digitized by Google

laquelle exige :

C.....	37,2
H.....	4,8
Ca O....	19,3

(*d*) *Soude caustique.* — Mêmes conditions que dans l'expérience (*a*). Le glucose disparaît sans fournir d'alcool; il ne se forme pas de globules de levûre.

(*e*) *Sulfite de soude.* — Du 18 mai au 27 juin; température ordinaire, contact de l'air. Il ne se forme pas d'alcool, ni de sulfures; la liqueur renferme toujours du glucose; il s'y développe une multitude de globules tout semblables à ceux de la levûre de bière, ainsi que quelques algues microscopiques. La caséine devient visqueuse et filante; lavée, elle n'a pas acquis les propriétés de la levûre de bière.

En présence du sulfite de chaux, on n'a pas davantage obtenu d'alcool; mais la liqueur s'est recouverte d'une sorte de chapeau formé par des végétaux microscopiques. Le sucre n'a pas disparu. Il ne s'est pas formé de mannite.

Les sulfites de chaux et de soude ne s'opposent pas à l'action de la levûre sur le glucose, du moins complétement.

(*f*) *Hyposulfite de soude.* — Mêmes conditions que (*e*). On obtient 6 parties d'alcool. La liqueur renferme encore du glucose et de l'hyposulfite, mais pas de sulfure. On y trouve en grande abondance une substance semblable à de la levûre délayée dans l'eau; cette substance, recueillie et lavée, n'exerce pas d'action sur le glucose.

L'hyposulfite de soude n'empêche pas l'action de la levûre sur le glucose.

(*g*) *Borate de soude.* — Mêmes conditions que (*e*). On obtient 9 parties d'alcool. La liqueur renferme encore du glucose. On y trouve une substance semblable à la levûre et des matières organiques diverses, dont quelques-unes rosées. Ces substances, recueillies et lavées, n'exercent pas d'action sur le glucose.

Le borax n'empêche pas l'action de la levûre sur le glucose.

Digitized by Google

(*h*) *Phosphate de soude.* — Mêmes conditions que (*e*). On obtient 9 parties d'alcool. Au bout d'un mois, le sucre a presque entièrement disparu (1). La liqueur renferme en abondance une matière semblable à la levûre; cette matière, recueillie et lavée, provoque immédiatement la fermentation du glucose, mais d'une manière incomplète. C'est donc une véritable levûre, mais dont l'activité est presque épuisée: cette expérience a été reproduite deux fois avec les mêmes résultats.

Ces conditions sont à peu près les seules dans lesquelles ait pris naissance une matière analogue à la levûre de bière par son action immédiate sur le glucose (2).

Mais on a pu voir se former fréquemment des globules organisés, doués d'une forme pareille à la levûre, dans les expériences précédentes. Dans ces conditions, ces globules présentent la même apparence que la levûre sans jouir en général de ses propriétés relativement au glucose; ils peuvent même prendre naissance dans un milieu où ne se forme pas d'alcool (sulfite de soude). La coïncidence dans la levûre de bière d'une forme déterminée et d'une activité spéciale n'est donc pas nécessaire dans toute fermentation alcoolique. Car on vient de voir des corpuscules organisés semblables se former sans jouir de la même activité et dans un milieu exempt d'alcool; au contraire, je vais maintenant exposer quelques expériences dans lesquelles l'alcool peut prendre naissance au sein d'un milieu où ne se forment pas d'êtres organisés : il suffit d'exclure l'accès de l'air.

En effet, le sucre de canne ou le glucose abandonnés dans

(1) Le phosphate de soude n'empêche pas l'action de la levûre sur le glucose.

(2) On sait que la fermentation alcoolique se développe spontanément dans les urines diabétiques exposées au contact de l'air. En même temps, il s'y forme, comme l'ont annoncé plusieurs observateurs, des globules semblables à la levûre et doués de même, vis-à-vis du sucre, d'une action immédiate; mais cette action m'a paru aussi peu prononcée que celle de la matière préparée au moyen des phosphates

Digitized by Google

une étuve avec de la craie et de la gélatine à l'abri du contact de l'air, fournissent de l'alcool sans qu'il y ait formation d'êtres organisés. J'ai opéré avec des liquides saturés d'acide carbonique, contenus dans des vases fermés par du mercure. Si l'on opère au contact de l'air, dans les mêmes conditions, on voit au contraire apparaître des êtres organisés; leur présence est donc indépendante de la production de l'alcool. Remarquons d'ailleurs que la gélatine est une substance artificielle et privée de toute structure organique définie.

J'ai montré plus haut que dans la fermentation alcoolique de la mannite, le corps azoté perd sous forme gazeuse presque tout l'azote qu'il renferme. Il m'a paru utile de rechercher si dans la formation alcoolique du sucre, provoquée par la levûre de bière, il ne se dégagerait pas également de l'azote. A cet effet, j'ai dissous 4 grammes de sucre de canne dans une quantité d'eau telle, que le liquide occupât 20 centimètres cubes; j'y ai délayé $0^{gr},200$ de levûre de bière, quantité insuffisante pour faire fermenter tout le sucre, et j'ai introduit le tout dans un flacon d'un litre rempli de mercure, et renversé sur ce liquide. Au bout de quarante-huit heures, la fermentation paraissant terminée, j'ai absorbé par la potasse l'acide carbonique formé; tout le gaz a disparu, à l'exception d'un volume inférieur à un demi-centimètre cube, et qu'il me paraît légitime d'attribuer à l'air dissous dans l'eau employée : d'ailleurs le poids de cet azote est inférieur au quarantième de l'azote contenu dans la levûre employée. Ainsi dans la fermentation alcoolique du sucre provoquée par la levûre de bière, il ne se forme pas d'azote en proportion sensible (1).

(1) Je crois utile de signaler encore la vérification suivante. On a annoncé, il y a quelques années, que le sucre dissous, chauffé avec de la levûre jusqu'à 70 degrés, non-seulement était soustrait à la fermentation alcoolique, mais se trouvait détruit complétement avec formation accélérée d'acide carbonique et d'un corps complémentaire non déterminé. Ces derniers faits sont erronés. Si l'on chauffe une solution sucrée avec de la levûre au-dessus de 50 degrés,

Digitized by Google

VI. — *Fermentation du sucre de lait.*

Le sucre de lait est analogue à la sorbine et au glucose par sa composition et par la plupart de ses réactions; mais, sans parler de sa transformation en acide mucique par l'acide azotique, on le distingue du glucose parce qu'il n'éprouve pas la fermentation alcoolique sous l'influence de la levûre; d'autre part, on le distingue de la sorbine, parce que le sucre de lait traité par un acide devient apte à éprouver la fermentation alcoolique au contact de la levûre de bière. Il éprouve également cette même transformation dans le lait, sous diverses influences encore mal connues, mais qui paraissent mises en œuvre par certaines peuplades.

Dans les conditions définies plus haut, le sucre de lait fournit une certaine quantité d'alcool, en même temps qu'une portion se change en acide lactique, et parfois une autre portion en substances spéciales non déterminées. Durant ces transformations, il ne se forme pas de sucre directement fermentescible au contact de la levûre. La production de la levûre de bière dans ces expériences est douteuse. Ce sont là des circonstances fort importantes, car elles paraissent prouver que, dans ces conditions, le sucre de lait se change directement en alcool sans passer par un état intermédiaire analogue à celui qu'il prend sous l'influence des acides.

---

la fermentation alcoolique s'arrête comme on le sait depuis longtemps, mais le glucose n'est nullement détruit; après refroidissement, il conserve la propriété de fermenter en fournissant la quantité normale d'alcool. Seulement, et c'est là, je pense, l'origine de l'illusion que je signale, si l'on chauffe rapidement une solution fermentante, le dégagement d'acide carbonique s'active d'abord et devient très-rapide en raison de deux causes, l'une chimique, et l'autre purement physique. A mesure que la température s'élève, jusque vers 45 à 50 degrés, la fermentation devient plus rapide; au-dessus de cette température elle s'arrête, mais l'acide carbonique déjà formé, et dissous dans les liquides, continue à se dégager pendant quelque temps sous l'influence de la chaleur.

Digitized by Google

Je me bornerai à donner ici deux expériences.

1. 10 grammes de sucre de lait, 120 d'eau, 10 de craie, 2 de fromage. Du 9 avril au 13 juin 1856 (deux mois) à 40 degrés. 1 gramme d'alcool (10 centièmes), du lactate de chaux. Durant l'expérience, il ne se forme pas de sucre directement fermentescible par la levûre, et le sucre de lait conserve ses caractères tant qu'il n'est pas détruit; on observe la formation de très-petits globules microscopiques, lesquels paraissent distincts de la levûre de bière.

2. 300 grammes de sucre de lait, 3500 d'eau, 300 de craie, 200 de fromage. A la température ordinaire. Du 15 décembre 1855 au 26 mai 1856 (cinq mois). 7 grammes d'alcool, du lactate de chaux et une matière gélatiniforme toute spéciale. Pas de mannite. L'acide lactique ainsi formé, traité par l'acide nitrique, ne fournit pas d'acide mucique, non plus que l'acide lactique du glucose.

On peut remplacer le fromage par d'autres matières azotées, par exemple, par le tissu pancréatique; on obtient également de l'alcool dont la formation n'est pas précédée par celle d'un sucre fermentescible au contact de la levûre.

Dans les conditions qui précèdent, la transformation du sucre de lait en alcool est toujours partielle; elle n'augmente pas par l'emploi d'un excès du corps azoté, car 1 partie de sucre de lait, abandonnée avec 1 partie de craie, 8 parties d'eau et 4 parties de fromage blanc, a fourni moins d'alcool qu'en opérant avec une quantité de fromage vingt fois plus petite.

Enfin la craie n'est pas indispensable; car le sucre de lait, abandonné avec de l'eau et du tissu pancréatique, a fourni un peu d'alcool. En même temps se sont développés de petits globules analogues à ceux de la levûre; durant l'expérience, le sucre de lait ne s'est pas changé en sucre immédiatement fermentescible au contact de la levûre.

J'ai encore cherché si le sucre de lait ne pourrait pas être entraîné dans la fermentation alcoolique du glucose pro-

Digitized by Google

voquée par la levûre, mais le glucose s'est détruit seul et le sucre de lait a résisté.

VII. — *Fermentation de l'amidon.*

On sait que l'amidon peut être représenté dans sa composition par du carbone et de l'eau; sous l'influence de la diastase et sous l'influence des acides, il fixe les éléments de l'eau et se change en glucose directement fermentescible au contact de la levûre de bière.

Dans les conditions définies précédemment, l'amidon se change directement en alcool, sans que les liqueurs renferment, à aucun moment, de sucre fermentescible au contact de la levûre, ou capable de réduire le tartrate cupropotassique : cette circonstance fort importante vient d'être signalée pour le sucre de lait; elle se retrouvera à l'occasion de la gomme arabique.

1. 10 grammes d'amidon, 120 d'eau, 10 de craie, 2 de fromage. Du 9 avril au 27 mai 1856 (six semaines). Vers 40 degrés.

1^{gr},6 d'alcool (16 centièmes); un sel calcaire soluble; pas de sucre, pas de levûre. Une partie de l'amidon demeure sans altération.

2. Mêmes proportions. Du 5 juin au 26 juin 1856 (trois semaines). On a examiné la liqueur tous les deux jours. Il ne s'y est pas formé de sucre. o^{gr},5 alcool.

VIII. — *Fermentation de la gomme arabique.*

La gomme présente la même composition que l'amidon et se change de même en sucre directement fermentescible sous l'influence des acides; mais la gomme, et sans doute le sucre correspondant, oxydés par l'acide nitrique, fournissent de l'acide mucique.

La gomme, traitée par la craie et le fromage, produit de l'alcool; cette formation n'est pas précédée par celle d'un sucre fermentescible au contact de la levûre de bière. Il ne

Digitized by Google

se forme ni levûre, ni mannite, ni glycérine, mais on a obtenu du lactate de chaux.

1. 10 grammes de gomme, 120 d'eau, 10 de craie, 2 de fromage. Du 9 avril au 27 mai 1856 (six semaines). A 40 degrés. 1^{gr},2 d'alcool (12 centièmes); ni levûre, ni sucre, ni glycérine; sel calcaire soluble. La liqueur renferme de la gomme transformable par l'acide sulfurique en sucre fermentescible.

2. 250 grammes de gomme, 3 litres d'eau, 250 de craie, 200 de fromage. Du 15 décembre 1855 au 26 mai 1856 (cinq mois). A la température ordinaire. Au début s'établit une fermentation putride. 6 grammes d'alcool; lactate de chaux, substances indéterminées; ni mannite, ni glycérine, ni sucre.

IX. — *Fermentation de la levûre de bière et des matières azotées.*

Ayant essayé si les diverses matières azotées, telles que: albumine dissoute ou coagulée, fibrine, caséine brute ou purifiée par l'eau, gluten du commerce, tissu pancréatique, gélatine, colle de poisson, levûre de bière, abandonnées soit avec de l'eau et de la craie, soit avec de l'eau, de la craie et du tissu pancréatique ou testiculaire, à la température de 40 degrés, pouvaient fournir de l'alcool, j'ai obtenu des résultats négatifs avec la fibrine, les tissus pancréatique et testiculaire, la gélatine, la colle de poisson et l'albumine coagulée.

Aucun de ces corps, traité par l'acide sulfurique à divers degrés de concentration, n'a fourni de sucre directement fermentescible. On avait annoncé que la gélatine jouit de cette propriété, mais l'expérience n'a jamais réussi entre mes mains, et je sais que d'autres chimistes fort habiles n'ont pas été plus heureux.

L'albumine brute, la caséine, le gluten et la levûre de bière ont quelquefois fourni un peu d'alcool; mais la for-

Digitized by Google

mation de cet alcool ne paraît pas due aux principes azotés eux-mêmes, mais aux matières sucrées, amylacées ou ligneuses dont ils se trouvent mélangés par accident ou par nécessité.

En effet, l'albumine brute est extraite de l'œuf, et le blanc d'œuf renferme du sucre, d'après les expériences de M. Barreswill dont j'ai eu l'occasion de vérifier l'exactitude. J'ai trouvé dans quelques essais cette proportion égale à $0^{gr},110$ par œuf. Ce sucre, après les traitements qui permettent de l'isoler (coagulation par l'alcool, évaporation en présence de l'acide acétique, etc.), est directement fermentescible au contact de la levûre; aussi, c'est à sa présence que je crois devoir attribuer les très-petites quantités d'alcool que fournit la fermentation de l'albumine brute : l'albumine coagulée par la chaleur ou par les acides, etc., ne fournit pas d'alcool (1).

La caséine brute renferme un peu de sucre de lait dissous dans l'eau interposée; j'ai trouvé cette proportion égale au $\frac{1}{40}$ du poids du fromage mou dans une expérience. De là les traces d'alcool que la caséine peut fournir. Lavée, elle n'en produit plus.

Le gluten du commerce renferme une proportion notable d'amidon transformable en sucre sous l'influence des acides, ou en alcool sous les influences que j'ai définies. Aussi l'em-

---

(1) Dans une expérience exécutée avec 50 grammes d'albumine, 250 grammes d'eau et 50 grammes de craie (du 5 juin au 5 juillet 1856), il s'est formé un sel particulier dont l'aspect, la solubilité et les propriétés apparentes sont tout à fait semblables à celles du lactate de chaux. Mais il s'en distingue par sa composition, car il fournit sur 100 parties :

Eau de cristallisation.	27,6
Chaux.	12,1

tandis que le lactate de chaux renferme :

Eau.	29,2
Chaux.	18,2

Je n'ai pu reproduire cette substance.

Digitized by Google

ploi de cette substance doit-il être évité. Cet amidon ne présente pas nécessairement la réaction comme au contact de l'iode, car cette réaction est masquée par certains corps azotés, à moins de précautions spéciales indiquées par M. Béchamp (*Journ. de Pharm.*, 3e serie, tome XXVII, page 411).

Quant à la levûre de bière, elle renferme également une matière non colorable par l'iode, probablement de nature ligneuse, transformable en sucre sous l'influence des acides, et en alcool sous les influences que j'ai définies : la proportion de cet alcool peut s'élever à plus de 1 centième du poids de la levûre. Il est d'ailleurs nécessaire d'opérer sur de la levûre véritable et bien lavée; celle des boulangers peut contenir en outre de l'amidon et du sucre soluble dans l'eau et directement fermentescible. La présence de ces corps et celle de la matière ligneuse ou analogue sont faciles à comprendre en raison de l'origine de la levûre : c'est ce corps ligneux qui demeure comme résidu de la levûre de bière, après qu'elle a épuisé son action sur le sucre.

D'après l'ensemble des faits que je viens d'exposer, la glycérine, la mannite, la dulcine, la sorbine, le sucre de lait, le sucre de canne et le glucose appartiennent à une même catégorie générale de composés organiques, caractérisée non-seulement par une composition, par des qualités physiques et par des fonctions chimiques analogues, mais aussi par la propriété singulière de se décomposer spontanément sous l'influence des ferments azotés, en donnant naissance à l'alcool et aux acides lactique, acétique, butyrique. Cette aptitude à fermenter, tout à fait prononcée dans le glucose, déjà moins évidente dans le sucre de canne, moins encore dans le sucre de lait et dans la sorbine, devient de plus en plus difficile à mettre en jeu dans les matières qui renfer-

Digitized by Google

ment un excès d'hydrogène, telles que la mannite, la dulcine et surtout la glycérine. Ces matières, plus stables vis-à-vis de la chaleur et des réactifs, résistent aussi davantage à l'influence des ferments azotés. Mais les métamorphoses semblables, qu'elles peuvent cependant éprouver sous cette influence, tendent à les rapprocher des sucres proprement dits.

Si l'on considère que ces corps, si analogues les uns aux autres, se trouvent en abondance, libres ou combinés, dans les tissus des végétaux, qu'ils se rattachent directement aux principes insolubles qui en forment la trame, enfin que la plupart des phénomènes de la physiologie botanique semblent rouler sur leurs transformations, il sera facile de comprendre quel intérêt s'attache à l'étude de leurs réactions. Les changements qu'ils éprouvent par voie de fermentation offrent une importance toute particulière en raison de la ressemblance qui existe entre ces phénomènes si différents des affinités ordinaires, et les phénomènes vitaux proprement dits. Étudier les fermentations, les diriger à volonté vers l'accomplissement de transformations chimiques définies, c'est mettre en œuvre des mécanismes analogues à ceux qui président aux métamorphoses de la matière dans les êtres vivants.

TRANSFORMATION DE LA MANNITE ET DE LA GLYCÉRINE EN UN SUCRE PROPREMENT DIT;

PAR M. BERTHELOT.

Les analogies qui existent entre la fermentation alcoolique de la mannite et de la glycérine et la fermentation alcoolique des sucres proprement dits, font naître tout d'abord l'opinion que ces deux fermentations pourraient bien n'être pas réellement distinctes : si la mannite et la glycérine fournis-

Digitized by Google

sent de l'alcool, c'est qu'elles ont passé, au préalable, par l'état de sucre?

Pour examiner cette question, j'ai entrepris des expériences très-variées : leurs résultats ont été différents suivant les circonstances.

Dans les conditions normales de la fermentation alcoolique de la mannite et de la glycérine, je veux dire sous les influences simultanées du carbonate de chaux et de la caséine, la transformation de la mannite et de la glycérine en alcool, soit à 40 degrés, soit même à 10 degrés, s'opère d'une manière directe, sans qu'à aucun moment de l'expérience on puisse saisir le moindre indice de l'existence temporaire d'un sucre proprement dit.

Mais la marche régulière de ces expériences est subordonnée à la présence du carbonate de chaux : s'il est supprimé, tantôt, et en général, la fermentation ne se développe pas : la mannite et la glycérine demeurent inaltérées; tantôt, et seulement dans des circonstances particulières, on peut observer la formation d'un sucre proprement dit. Je vais exposer le résumé de ces diverses observations.

La mannite et la glycérine dissoutes dans l'eau ont été abandonnées à la température ordinaire au contact de tous les tissus et substances azotées de nature animale ou analogues que j'ai pu me procurer. Dans plusieurs cas, il s'est produit un sucre proprement dit, susceptible de réduire le tartrate cupropotassique et d'éprouver immédiatement, sous l'influence de la levûre de bière, la fermentation alcoolique. Les conditions de cette formation de sucre sont, les unes susceptibles d'être définies avec quelque rigueur, les autres exceptionnelles.

Ainsi, j'ai observé cette formation avec l'albumine, la caséine (1), la fibrine, la gélatine, les tissus cutané, rénal,

(1) J'ai indiqué (pages 333 et 367) quelques causes d'erreur contre lesquelles on doit se tenir en garde dans ces expériences. Ces causes d'erreur sont

Digitized by Google

pancréatique, etc., mais toujours accidentellement (1) et sans réussir à fixer les conditions du phénomène.

Un seul tissu, celui du testicule, provoque d'une manière à peu près régulière la transformation de la mannite et de la glycérine en sucre proprement dit. Voici dans quelles circonstances : On prend des testicules d'homme ou d'animaux (coq, chien, cheval), on les coupe en petits morceaux et on les abandonne dans une solution formée de 10 parties d'eau et de 1 partie de mannite ou de glycérine; le poids du tissu animal (supposé sec) doit représenter $\frac{1}{20}$ environ du poids de la mannite ou de la glycérine. On opère dans un flacon ouvert, sous l'influence de la lumière diffuse et à une température qui doit rester comprise entre 10 et 20 degrés. Le tissu demeure en général sans se putréfier : s'il pourrit, l'expérience est manquée. La formation des moisissures et particulièrement du *Penicillium glaucum* est également nuisible, quoiqu'à un moindre degré. On essaye de temps en temps la liqueur; au bout d'un intervalle qui varie entre trois mois et une seule semaine, on constate d'ordinaire l'apparition d'une substance apte à réduire le tartrate cupropotassique et à fermenter immédiatement au contact de la levûre de bière. A ce moment, on sépare par décantation les fragments testiculaires, et on les soumet à des lavages réitérés, jusqu'à élimination totale de la mannite ou de la glycérine : dans cet état, ils ont acquis la propriété de transformer ces deux substances en un sucre véritable. Pour atteindre ce but, on reproduit avec les tissus préparés l'expérience que je viens de décrire; elle réussit en général et fournit presque toujours une certaine proportion de sucre.

---

surtout relatives à la préexistence d'un sucre dans les matières premières employées, telles que caséine, albumine, manne et mannite.

(1) L'albumine purifiée a donné lieu assez fréquemment à la formation d'un sucre; mais l'expérience ne réussit bien que si l'on emploie poids égaux de mannite ou de glycérine et d'albumine; cette circonstance jette de l'incertitude sur l'origine du sucre. Le tissu hépatique lavé n'a fourni aucun résultat.

Digitized by Google

Il suffit même d'imprégner le tissu avec une solution de mannite ou de glycérine pour observer au bout de quelques semaines une formation de sucre très-abondante.

Quelques expériences réalisées avec la dulcine ont donné lieu à des résultats semblables.

Le sucre ainsi formé est analogue au glucose par la plupart de ses propriétés ; il n'a pu être obtenu sous forme cristallisée ; il est très-soluble dans l'eau, dans l'alcool aqueux et dans la glycérine, dont on ne peut guère le séparer. C'est un corps assez hygrométrique, très-altérable durant l'évaporation de ses dissolutions, susceptible de brunir sous l'influence des alcalis et de réduire le tartrate cupropotassique ; l'acétate de plomb ammoniacal ne le précipite pas en proportion sensible. Au contact de la levûre de bière, il fermente immédiatement avec production d'alcool et d'acide carbonique. Il était fort important de vérifier si ce sucre possède le pouvoir rotatoire ; malheureusement la facilité avec laquelle il se colore et s'altère durant la concentration de ses dissolutions m'a empêché d'établir ce point avec une certitude complète. Une seule fois, j'ai réussi à observer une déviation de la teinte de passage égale à $-5°,5$ sous la longueur de 200 millimètres avec une liqueur renfermant environ $\frac{1}{20}$ de sucre ; ce sucre serait donc lévogyre et distinct du glucose et de la plupart des autres sucres par le sens de son pouvoir rotatoire. J'espère établir complétement ce caractère essentiel par des observations ultérieures.

Quelle est l'origine de cette substance et quelle influence le tissu testiculaire exerce-t-il sur sa formation ?

L'origine de ce sucre est assez difficile à établir, car sa proportion varie extrêmement : tantôt elle représente à peine quelques dix-millièmes du poids de la mannite ou de la glycérine employées, tantôt elle s'élève jusqu'au dixième du poids de ces mêmes matières ; la dernière proportion n'a pu être dépassée. Ces variations s'expliquent par deux causes principales : d'une part, le milieu au sein duquel la fer-

Digitized by Google

mentation s'opère, change par le fait même de cette fermentation; d'autre part, le sucre formé se détruit sous des influences presque identiques à celles qui lui ont donné naissance. Durant les chaleurs de l'été, par exemple, on trouve souvent dans les liqueurs une certaine proportion d'alcool qui semble résulter de la destruction du sucre formé tout d'abord. Observons enfin que le poids de la mannite et de la glycérine disparues est toujours supérieur au poids du sucre que l'on constate par l'analyse.

Malgré ces difficultés, la proportion du sucre formé dans les circonstances les plus favorables est assez forte pour que l'on doive le regarder comme produit surtout par la mannite et par la glycérine. Entre les nombreuses expériences que j'ai faites pour éclaircir ce point, je choisirai l'une des plus décisives.

Le 18 décembre 1856, on a pesé 2 grammes de testicules frais de coq (représentant à l'état sec $0^{gr},280$), 5 grammes de mannite et 50 grammes d'eau; on a introduit le tout dans un flacon communiquant avec l'atmosphère à travers un tube rempli de coton cardé; le flacon a été abandonné dans un laboratoire médiocrement chauffé. Le 12 avril 1857, on a mis fin à l'expérience. La liqueur renfermait $0^{gr},250$ de sucre proprement dit. Les fragments de testicule avaient conservé leur forme et leur aspect microscopique; un examen très-attentif y fit découvrir quelques traces presque inappréciables de végétaux. Lavés et séchés, ces fragments pesaient $0^{gr},230$; ils avaient donc perdu $0^{gr},050$. Cette perte est d'ailleurs plus apparente que réelle, car les testicules frais renferment une certaine proportion de substances salines et autres solubles dans l'eau; de plus, une partie du tissu se désagrége durant l'expérience et devient également soluble, sans se changer en sucre; tous ces produits sont évalués comme perte, bien qu'on les retrouve à l'état soluble et en partie coagulable durant l'évaporation des liqueurs. Si l'on tient compte de ces diverses circonstances et de la proportion du

Digitized by Google

sucre formé dans l'expérience qui précède et dans diverses autres, ainsi que des analogies de composition et de constitution qui existent entre les sucres, la mannite et la glycérine, on sera conduit à regarder le sucre produit dans les expériences précédentes, comme résultant surtout, et peut-être même exclusivement, de la transformation de la mannite et de la glycérine. J'ai pu d'ailleurs confirmer cette conclusion par d'autres expériences dans lesquelles le tissu testiculaire a produit, sans diminuer notablement, jusqu'à sept fois consécutives la transformation de la mannite en sucre.

Ces phénomènes tendent à assimiler l'influence du tissu testiculaire aux actions de contact proprement dites que l'on a observées en chimie minérale ; cette interprétation est confirmée par la permanence de la structure microscopique du tissu testiculaire dans le cours des expériences. Mais ce sont là des probabilités plutôt qu'une démonstration.

En effet, les tissus animaux ne jouissent pas de cette invariabilité absolue de composition qui caractérise souvent les composés minéraux agissant par contact. En même temps que le tissu agit, il s'altère d'une manière continue, il se décompose sans se putréfier, comme l'attestent les analyses suivantes.

Elles ont porté sur le tissu testiculaire isolé des matières grasses, et au besoin des végétaux microscopiques ; il avait provoqué tantôt deux fois, tantôt trois fois la formation du sucre. Il renfermait, cendres déduites,

C.... de 50,0 à 46,0
H... de 7,8 à 8,8
Az... de 10,5 à 4,0
O, etc. de 32,7 à 39,2

Or la composition moyenne de la fibrine et des matières

Digitized by Google

analogues est de

C.....	54,0
H.....	7,3
Az....	15,8
O, etc.	22,9.

Ainsi l'on ne peut décider avec toute rigueur si le tissu opère par action de contact, en raison de sa structure organique ou de sa constitution chimique, ou bien si le fait même de sa décomposition exerce quelque influence.

Enfin le contact de l'air, sans lequel ces expériences n'ont pas pu réussir, introduit une complication nouvelle : car il permet le développement d'êtres microscopiques animaux, et surtout végétaux ; ce développement n'a jamais pu être évité complétement, mais il semble plus nuisible que favorable à la formation du sucre. Dans les expériences les plus heureuses, la formation des êtres organisés était la plus faible possible; ainsi, dans celle dont j'ai cité plus haut les résultats numériques, leur présence ne s'est manifestée que par un examen très-minutieux.

Ces détails, que j'ai cherché à rendre aussi fidèles que possible, montrent combien sont complexes les phénomènes de fermentation, combien ils renferment d'éléments inconnus ou obscurs. Cependant les chimistes peuvent mettre en jeu les forces qui les provoquent, les faire agir sur des corps définis et les diriger vers l'accomplissement de métamorphoses déterminées. C'est à peu près de la même manière qu'ils font agir les affinités ordinaires dont la nature intime ne leur est guère mieux connue. L'emploi des ferments ne s'en distingue que par la préexistence d'une forme, d'une constitution particulière, extrêmement mobile et produite en dehors de notre intervention sous l'influence de la vie.

Quoi qu'il en soit, les expériences que je viens d'exposer se distinguent par leur caractère synthétique des fermentations connues jusqu'à ce jour. Au lieu de changer le sucre,

Digitized by Google

la mannite et la glycérine en alcool, acide lactique, acide butyrique, composés plus simples et plus difficiles à décomposer, elles conduisent à transformer la mannite et la glycérine, corps assez stables, privés du pouvoir rotatoire et qui touchent à ceux que nous savons produire, en une substance douée d'une stabilité moindre et d'un ordre de complication plus élevé, je veux dire en un sucre véritable, analogue aux sucres qui se forment sous l'influence de la vie, au sein des tissus des végétaux et des animaux.

Une telle formation de sucre aux dépens de la glycérine mérite une attention toute spéciale par les liens qu'elle établit entre ce sucre et les substances qui peuvent servir à préparer la glycérine. D'un côté, la glycérine unie aux acides gras forme les corps gras neutres, c'est-à-dire les principes immédiats des graisses des animaux. Changer la glycérine en sucre, c'est donc produire cette dernière substance au moyen de la graisse elle-même.

Mais les rapprochements suivants sont encore plus remarquables. La glycérine peut être reproduite artificiellement à l'aide du propylène, c'est-à-dire à l'aide d'un carbure d'hydrogène dont j'ai réalisé la synthèse en unissant les corps simples qui le constituent. Dès lors, par une série de transformations définies, dont l'une repose sur un mécanisme emprunté à la vie, on peut préparer un sucre de toutes pièces au moyen des corps simples que l'analyse y met en évidence, je veux dire au moyen du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène : c'est le degré le plus élevé auquel soit encore parvenue la synthèse chimique.

NOTE SUR LE SOUFRE MOU DES HYPOSULFITES;

PAR M. BERTHELOT.

Dans mes recherches sur le soufre, j'ai insisté sur la nécessité d'isoler rapidement le soufre de ses combinaisons,

Digitized by Google

et particulièrement des composés dans lesquels son rôle électrique est peu prononcé, tels que les hyposulfites notamment. En effet, le soufre insoluble, tant qu'il n'a pas pris la forme solide, ne possède qu'une stabilité relative : s'il se trouve dans des conditions défavorables, une portion peut changer de nature et revenir à l'état le plus stable, je veux dire à l'état de soufre octaédrique. Un grand nombre de faits de ce genre se trouvent développés dans mon Mémoire (p. 437, 445, 455). Ces faits sont surtout relatifs aux conditions dans lesquelles prend naissance le soufre insoluble. Depuis, j'ai observé quelques phénomènes encore plus caractéristiques, car ils démontrent les transformations qu'éprouve sous la seule influence du temps le soufre tout formé et déjà isolé de ses combinaisons.

Je rappellerai d'abord que ce corps simple, précipité des hyposulfites dans les conditions les plus favorables (voir p. 458), est formé principalement par un mélange de deux soufres, l'un mou et insoluble dans le sulfure de carbone, l'autre mou et soluble dans ce liquide, mais susceptible de devenir insoluble par le seul fait de son évaporation.

Ces propriétés doivent être constatées au moment même où le soufre vient d'être précipité : plus tard une portion très-notable du soufre mou demeuré d'abord insoluble, et une portion du soufre mou entré en dissolution dans le sulfure de carbone, se trouvent changées en soufre cristallisable. C'est ce qui résulte des faits suivants :

1. Dans une expérience, le soufre des hyposulfites, examiné immédiatement, est demeuré en grande partie insoluble dans le sulfure de carbone ; la portion dissoute tout d'abord, à la suite de sept évaporations opérées coup sur coup, s'est changée graduellement en soufre insoluble, sauf une très-petite quantité encore soluble, mais non cristallisable.

2. Dans une autre expérience, on a examiné au bout de quelques heures le soufre recueilli. Sur 20 parties, 15 sont demeurées insolubles à l'état mou, et des 5 parties dis-

Digitized by Google

soutes tout d'abord, 4 sont devenues insolubles dans le cours des évaporations; 1 partie s'est trouvée finalement formée par du soufre cristallisable.

3. Ayant mis à part une portion du soufre obtenu dans cette expérience, j'ai conservé séparément le soufre mou tout d'abord insoluble ($\frac{14}{20}$), et la solution sulfocarbonique du reste ($\frac{5}{20}$). Après quelques semaines, j'ai soumis le tout à un nouvel examen. Le soufre mou, d'abord insoluble, avait durci et renfermait une grande quantité de soufre octaédrique mélangé avec du soufre insoluble. Quant à la solution sulfocarbonique, une très-petite quantité de soufre insoluble s'en était séparée spontanément. La solution renfermait, sur 20 parties de soufre, 19 de soufre octaédrique, et 1 partie seulement de soufre susceptible de devenir insoluble.

Ainsi, sous la seule influence du temps, la plus grande partie du soufre mou des hyposulfites, tout d'abord insoluble ou susceptible de devenir telle, peut se changer spontanément en soufre octaédrique. Ces phénomènes rappellent ceux que j'ai signalés dans la formation du soufre insoluble au sein du soufre mou produit sous l'influence de la chaleur.

MÉMOIRES SUR LA CHIMIE PUBLIÉS A L'ÉTRANGER.

PAR M. ADOLPHE WURTZ.

Sur le Cobaltate de potasse; par MM. Schwarzenberg et Pebal (1).

On ajoute 1 partie de carbonate de cobalt, par petites portions, à 6 ou 8 parties d'hydrate de potasse fondu; l'oxyde de cobalt se dissout avec une coloration bleue. Lorsqu'on maintient pendant quelque temps cette masse en fusion au

(1) *Annalen der Chemie und Pharmacie*, tome XCVII, page 201, et tome C, 57 (nouvelle série, tome XXIV), décembre 1856.

Digitized by Google

creuset d'argent, elle brunit et laisse déposer une combinaison de cobalt cristallisée en lames hexagonales. On traite la masse refroidie par l'eau, et l'on obtient ainsi des cristaux noirs et brillants qui sont du cobaltate de potasse. Séchés à 100 degrés, ils renferment

$$KO, 3\,Co^3\,O^5 + 3\,HO \text{ (Schwarzenberg).}$$

A 130 degrés, ils perdent 1 équivalent d'eau. L'exactitude de cette formule a été confirmée par M. Pebal.

Sur un nouvel alcaloïde dans la Ciguë ; par M. Th. Wertheim (1).

Lorsque l'on épuise avec de l'eau aiguisée d'acide sulfurique les fleurs du *Cqnium maculatum*, et que l'on soumet l'extrait moyennement concentré à la distillation avec de la chaux ou de la potasse, on obtient dans le récipient une liqueur très-alcaline qui renferme, indépendamment de l'ammoniaque et de la conicine, une nouvelle base organique.

Pour l'obtenir, on neutralise par l'acide sulfurique le produit de la distillation ; on évapore la solution au bain-marie en consistance sirupeuse, on reprend le résidu par l'alcool absolu, on distille l'alcool et l'on traite l'extrait alcoolique refroidi par la potasse caustique que l'on ajoute par petites portions. On agite ensuite ce mélange à plusieurs reprises avec de l'éther, et l'on distille la solution au bain-marie. Le résidu, introduit dans une petite cornue tubulée, est soumis à la distillation fractionnée dans un courant de gaz. Il passe d'abord de l'éther avec de la conicine, puis de la conicine pure, et vers la fin de la distillation la voûte et le col de la cornue se recouvrent de paillettes incolores et irisées. On détache cette croûte cristalline des parois de la cornue, et, après l'avoir fortement re-

(1) *Annalen der Chemie und Pharmacie*, tome C, page 328 (nouvelle série, tome XXIV), décembre 1856.

Digitized by Google

froidie à l'aide d'un mélange réfrigérant, on l'exprime entre des feuilles de papier. On purifie les cristaux exprimés en les faisant cristalliser à plusieurs reprises dans l'éther.

280 kilogrammes de fleurs de ciguë ont donné 17 grammes de produit.

La base ainsi purifiée constitue des paillettes incolores, nacrées et irisées ; elle fond à une douce chaleur, et se sublime lentement même au-dessous de 100 degrés. A une température plus élevée elle se sublime rapidement et sans laisser de résidu, en répandant au loin l'odeur particulière de la conicine. Elle est assez soluble dans l'eau, très-soluble dans l'alcool et dans l'éther : ces solutions sont fortement alcalines. Elle chasse l'ammoniaque de ses combinaisons, même à la température ordinaire ; mais, d'un autre côté, elle paraît être déplacée elle-même par la conicine. Lorsque l'on neutralise la solution alcoolique de la nouvelle base avec l'acide chlorhydrique, et que l'on y ajoute une solution alcoolique de chlorure de platine, on obtient par l'évaporation spontanée de magnifiques cristaux d'un sel double. Ces cristaux sont des tables rhomboïdales, très-volumineuses et colorées en rouge hyacinthe. Ils renferment

$$C^{18}\,H^{17}\,Az\,O^2,\ Cl\,H,\ Pt\,Cl^2.$$

La composition de la base elle-même est par conséquent représentée par la formule $C^{18}H^{17}AzO^2$. On voit qu'elle ne diffère de la conicine que par les éléments de 2 HO. On peut donc la désigner sous le nom de *conhydrine*, mot qui exprime cette relation de composition. L'acide phosphorique anhydre, chauffé avec la conhydrine à une température d'environ 200 degrés, lui enlève 2 équivalents d'eau, et la transforme en conicine :

$$C^{18}H^{11}AzO^2 = 2\,HO + C^{18}H^{15}Az.$$

Cette conicine artificielle possède toutes les propriétés de la conicine naturelle. Elle forme avec l'acide chlorhydrique une combinaison cristallisable en prismes rhomboïdaux.

Digitized by Google

Elle est très-toxique. La conhydrine l'est à un degré beaucoup moindre.

MÉMOIRES SUR LA PHYSIQUE PUBLIÉS A L'ÉTRANGER.

EXTRAITS PAR M. VERDET.

Rémarques sur la nature de la chaleur et la constitution des fluides élastiques; par M Joule (1).

Les recherches expérimentales de M. Joule sur l'équivalent mécanique de la chaleur l'ont naturellement conduit à considérer la chaleur comme un mouvement, et à voir dans le principe de l'équivalence du travail et de la chaleur un cas particulier du principe des forces vives. Dès 1846, dans un appendice à un travail sur l'électrolyse de l'eau, inséré au tome VII des *Mémoires de la Société littéraire et philosophique de Manchester,* il a indiqué un mouvement de rotation des atmosphères électriques des molécules comme étant la cause probable de la chaleur, et il a annoncé qu'il était parvenu à démontrer la loi de Mariotte à l'aide de cette hypothèse. Dans le Mémoire qui nous occupe, il a abandonné ce point de vue, et, se bornant à considérer les fluides élastiques, il a admis que les molécules de ces fluides s'écartent constamment les unes des autres avec une vitesse qui est constante tant qu'elles ne viennent pas choquer une paroi solide ou d'autres molécules, la pression du gaz résultant du choc de ses molécules contre les parois. Cette idée théorique a été énoncée pour la première fois par Herapath (2).

(1) Ce Mémoire a été lu par M. Joule le 3 octobre 1848 devant la Société littéraire et philosophique de Manchester et imprimé en 1851 dans le t. IX, 2e série, des *Mémoires* que publie cette Société.

(2) Dans un Mémoire sur les causes, les lois et les phénomènes de la chaleur, des gaz, de la gravitation, etc., publié dans les *Annals of Philosophy*, 2e série, tome 1er.

Digitized by Google

Nous traduisons textuellement la partie de son Mémoire où M. Joule développe les conséquences de cette hypothèse :

« Supposons une enveloppe d'un pied cube de capacité, pleine de gaz hydrogène à la température de 60 degrés Fahrenheit, et sous la pression de 30 pouces de mercure, le poids du gaz sera de 36,927 grains (1). Concevons que cette masse soit divisée en trois particules infiniment petites et parfaitement élastiques, chacune du poids de 12,309 grains, et que chaque particule oscille entre deux parois opposées du cube, avec une vitesse uniforme, excepté à l'instant du choc contre les parois, et cherchons quelle doit être cette vitesse pour produire sur les parois une pression égale à la pression atmosphérique, c'est-à-dire à 14831712 grains. On sait que si un corps est animé d'une vitesse de 32,16 pieds par seconde, en lui opposant pendant une seconde une pression égale à son poids, on le fera rentrer au repos, et qu'en continuant l'action de cette pression pendant une deuxième seconde le corps prendra une vitesse égale et opposée à sa vitesse primitive. Si les particules d'hydrogène étaient animées de cette vitesse, elles choqueraient chaque paroi du cube 32,16 fois en deux secondes, et la pression résultante serait égale au poids de la molécule multipliée par le nombre des chocs, c'est-à-dire à 395,938 grains. Par conséquent, comme il est évident que la pression est proportionnelle au carré de la vitesse, on trouve que la vitesse nécessaire pour produire une pression égale à une atmosphère est de 6225 pieds par seconde.

» On retrouverait la même vitesse quand bien même les particules se choqueraient entre elles, et choqueraient les parois du cube sous toutes les inclinaisons, et en quel-

(1) Les nombres cités par M. Joule n'étant pas tous parfaitement exacts, nous les avons laissés exprimés en mesures anglaises.

Digitized by Google

que nombre de particules que l'on supposât divisée la masse d'hydrogène.

» S'il n'y a dans le cube que la moitié de la masse d'hydrogène précédente, et que la vitesse des particules soit la même, la pression sera évidemment réduite à moitié, ce qui démontre la loi de Mariotte.

» La vitesse de 6225 pieds par seconde convient à la température de 60 degrés Fahrenheit ; mais on sait que le volume d'un gaz demeurant constant, et sa température variant de 60 à 32 degrés Fahrenheit, sa pression diminue dans le rapport de 519 à 491 ; de là on conclut que la vitesse des molécules, à la température de la congélation de l'eau, est de 6055 pieds par seconde.

» Si l'on supposait aux particules d'hydrogène des grandeurs sensibles, le choc des particules contre les parois aurait une durée appréciable, et il faudrait un peu diminuer les vitesses précédentes.

» Puisque la pression d'un gaz augmente avec sa température suivant une progression arithmétique, et puisque la pression est proportionnelle au carré de la vitesse des particules, ou à leur force vive, on voit que la température absolue, la pression et la force vive sont proportionnelles entre elles, et que le zéro absolu de chaleur est à — 459 degrés Fahrenheit. »

M. Joule s'occupe ensuite de calculer la chaleur spécifique de l'hydrogène en déterminant l'accroissement de vitesse, et par conséquent de force vive qui doit résulter d'une élévation de température de 1 degré, et transformant cet accroissement en accroissement de chaleur au moyen de l'équivalent mécanique de la chaleur. Il trouve de la sorte le nombre 1,506, la chaleur spécifique étant rapportée au poids ; les chaleurs spécifiques des divers gaz simples seraient d'ailleurs en raison inverse des densités.

Digitized by Google

JOURS DU MOIS.	9 HEURES DU MAT. Temps vrai.			MIDI. Temps vrai.			3 HEURES DU SOIR. Temps vrai.			6 HEURES DU SOIR. Temps vrai.			9 HEURES DU SOIR. Temps vrai.			MINUIT. Temps vrai.			THERMOM.		ÉTAT DU CIEL	VENTS
	Barom. à 0°.	Thermom. extér. fixe et corr.	HYGROMÈTRE.	Barom. à 0°.	Thermom. extér. fixe et corr.	HYGROMÈTRE.	Barom. à 0°.	Thermom. extér. fixe et corr.	HYGROMÈTRE.	Barom. à 0°.	Thermom. extér. fixe et corr.	HYGROMÈTRE.	Barom. à 0°.	Thermom. extér. fixe et corr.	HYGROMÈTRE.	Barom. à 0°.	Thermom. extér. fixe et corr.	HYGROMÈTRE.	Maxima.	Minima.	A MIDI.	A MIDI.
1	769,19	5,3	86	768,73	9,1	83	767,13	10,2	78	767,32	10,0	81	767,70	7,9	87	767,26	6,0	93	10,5	3,6	Beau ; quelq. cumulus.	N.E. faible.
2	767,47	6,8	87	767,08	10,6	74	766,12	12,1	70	766,75	9,4	81	767,21	6,6	92	766,98	5,2	95	12,2	4,3	Beau ; quelq. cumulus.	E.N.E faib
3	767,35	2,7	93	766,09	9,7	78	765,06	13,7	62	764,74	11,9	64	765,02	9,2	85	764,88	6,2	93	14,3	1,0	Beau ; vapeurs.....	N.O faible.
4	764,86	1,8	99	763,71	4,4	92	762,55	5,8	90	761,45	5,6	91	761,32	6,0	94	761,08	7,4	97	7,4	1,7	Couvert.....	N.N.O.faib.
5	767,08	3,8	76	767,38	6,2	52	766,15	7,4	51	765,78	5,6	63	764,75	2,2	76	763,32	3,0	73	7,5	3,1	Beau ; cumulus.....	N.N.O. fai
6	761,46	5,8	76	760,78	8,0	78	759,98	8,4	87	759,86	8,2	93	759,71	7,8	96	759,62	7,7	97	8,7	2,5	Couvert.....	S.O. faible.
7	757,85	8,6	95	757,15	9,8	88	753,01	11,0	85	755,16	9,8	89	754,98	8,1	96	754,46	7,3	96	11,5	6,9	Couvert.....	O. faible.
8	750,89	7,8	85	749,83	9,0	64	748,62	9,8	60	747,24	2,8	98	747,04	2,9	87	747,36	1,1	89	10,5	5,6	Couvert ; qq. éclaircies.	S O. faible.
9	749,87	2,3	76	750,12	0,7	73	750,40	3,3	32	751,92	3,2	60	753,48	2,3	66	754,02	1,9	71	4,7	0,2	Couvert ; qq. éclaircies.	O. assez fo
10	756,00	1,4	71	755,94	2,4	61	755,60	2,8	59	755,35	2,1	66	755,82	1,3	67	755,66	—0,3	81	3,0	1,2	Couvert.....	O.N.O. faib
11	755,60	—0,2	64	755,23	0,2	41	754,54	0,8	42	755,82	0,0	47	756,92	— 1,1	55	757,63	—1,7	58	1,0	—1,9	Beau ; vapeurs.....	N. faible.
12	759,84	0,6	58	760,19	2,2	45	760,23	2,4	46	760,96	1,9	59	761,04	1,1	67	760,93	0,5	68	2,6	—3,9	Couvert.....	N.N.O. faib
13	758,17	1,8	70	755,89	3,4	59	753,56	6,1	53	752,51	5,2	60	751,85	2,0	83	750,83	2,2	91	6,8	—1,9	Beau ; vapeurs.	S. faible.
14	745,29	5,6	100	744,72	9,6	97	744,51	12,7	88	745,37	11,9	91	745,68	11,2	95	745,52	11,5	96	13,0	2,1	Couvert.....	S.S.O. faib.
15	745,49	11,8	94	749,30	9,1	81	751,76	9,6	70	754,02	8,2	74	756,76	5,0	75	757,84	5,1	78	12,2	6,5	Couvert.....	O. fort.
16	760,63	6,3	80	760,31	11,0	57	759,50	11,6	53	759,36	8,6	62	759,24	6,6	66	758,30	6,2	70	12,1	2,4	Beau ; cumulus.	O. faible.
17	754,39	9,4	70	753,75	12,9	68	753,09	16,4	62	752,12	14,5	70	752,56	12,1	84	752,36	8,8	94	16,6	6,8	Beau ; vap. à l'horizon.	S.S.O. faib
18	752,84	10,8	85	752,32	13,3	76	751,79	15,9	75	752,72	12,1	82	753,24	10,6	86	753,70	9,8	90	14,1	8,8	Couvert.....	S S E. faib
19	753,42	11,6	85	753,43	13,8	72	754,75	15,3	72	754,96	14,0	80	755,65	11,9	85	755,90	10,6	88	15,7	9,2	Couvert	S. faible.
20	755,23	10,6	84	755,22	11,2	75	754,76	11,2	71	754,96	8,9	69	754,36	7,4	66	754,26	4,1	69	11,8	9,5	Couvert; pluie rare ..	S E. faible.
21	752,95	1,2	64	752,62	3,3	58	751,81	4,3	52	753 00	2,4	54	753,26	0,1	59	753,52	—1,3	71	4,7	0,4	Éclaircies ; cumules...	E.N.E fai
22	753,15	0,4	66	752,54	3,0	48	751,65	4,3	44	752,19	4,1	45	752,17	3,5	46	752,20	3,2	56	4,6	—1,2	Très-vaporeux.....	N N O. fai
23	751,32	3,3	61	750,75	7,1	40	750,19	7,6	41	750,10	5,9	48	750,20	4,2	59	750,04	1,9	81	8,2	2,4	Beau ; vapeurs ; cumu.	O.S.O. faib
24	749,41	5,0	73	748,02	8,0	52	746,80	8,8	54	746,25	6,6	66	745,99	4,8	80	745,21	4,9	83	9,8	—1,0	Couvert.....	S.O faible.
25	745,22	7,2	96	746,99	8,0	73	748,06	9,4	55	748,90	8,2	54	749,62	4,6	69	749,83	3,3	77	10,1	5,0	Couvert.....	O.S.O. faib
26	750,45	6,2	70	750,72	0,5	49	750,68	11,0	44	752,60	6,8	74	754,54	4,2	84	755,83	3,4	88	11,8	0,2	Beau ; nomb cumulus.	O faible.
27	758,72	5,8	78	758,54	10,4	49	757,60	11,5	43	757,70	10,2	48	756,44	6,2	67	758,40	4,4	79	11,7	1,6	Beau ; vapeurs.....	O. faible.
28	758,34	8,6	65	756,66	11,5	48	756,31	12,8	43	755,86	10,5	46	756,05	8,4	55	755,89	5,4	70	13,6	1,1	Très-vaporeux.....	E.N.E.
29	754,06	9,2	65	752,33	13,1	44	750,87	14,1	46	750,33	12,4	43	748,92	9,9	52	747,21	7,8	68	14,5	2,7	Beau ; vapeurs.....	E.
30	743,99	7,9	95	743,07	13,1	60	742,62	12,0	57	743,31	8,9	75	743,69	6,6	87	743,27	6,6	89	14,5	6,1	Nuageux ; qq. éclaircies	
31	741,66	8,0	91	740,34	8,5	79	739,69	7,4	92	741,17	7,1	93	742,89	6,4	95	740,46	4,9	96	9,0	4,3	Couvert ; pluie.....	

* Observation faite à 9 h. 40m du soir.

Quantité de pluie en millimètres tombée pendant le mois : Cour, 25mm,10; terrasse, 18mm,55.

Digitized by Google

MÉMOIRE SUR LA TORSION;

PAR M. G. WERTHEIM.

SECONDE PARTIE.

Sur les effets magnétiques de la torsion.

XXVI. — On sait depuis longtemps que les torsions, les flexions, les allongements, les vibrations régulières ou irrégulières que l'on imprime à une barre de fer placée sous l'influence de la terre ou d'un autre aimant quelconque, ont pour effet de faciliter et d'accélérer le développement du magnétisme dans cette barre; et l'on dit habituellement que ces actions mécaniques aident à la séparation des deux fluides magnétiques.

Depuis Gilbert, qui paraît les avoir observés le premier, jusqu'à Gay-Lussac, qui commença à les analyser, on constata fréquemment ces faits au moyen d'expériences variées; mais on avait pour but principal de fabriquer des aimants puissants sans le secours d'aucun aimant autre que la terre, et l'on se contenta presque de l'explication donnée par Réaumur (1), d'après laquelle « les chocs tendent à rendre » réguliers les tourbillons de matière magnétique qui » préexistent dans le fer. »

Lorsque Coulomb eut introduit dans la science la notion de la force coercitive, on crut trouver dans cette force l'explication de ces phénomènes; on admit que les actions mécaniques donnent au fer doux une force coercitive suffisante pour maintenir séparés les deux fluides, qui sans cette force se recomposeraient et se neutraliseraient instantanément. Mais les expériences de M. Scoresby (2) auraient

(1) *Mémoires de l'Académie des Sciences*, 1723.

(2) Édinb., *Phil. Journ.*, 1821, et *Phil. Transact.*, 1822.

Digitized by Google

dû faire abandonner déjà cette théorie. Ce physicien a fait voir en effet que les mêmes actions mécaniques qui font acquérir du magnétisme au fer, lorsqu'il est placé dans le plan du méridien magnétique, le lui font perdre lorsqu'il se trouve dans un plan perpendiculaire à celui-ci; il observa de même que des chocs brusques font perdre une grande partie de son magnétisme à un barreau d'acier suffisamment trempé et fortement aimanté, quelle que soit du reste sa position par rapport aux pôles magnétiques de la terre.

Les recherches de M. Baden-Powell (1) se rattachent à celles de M. Scoresby; elles avaient pour but de faire connaître la loi suivant laquelle varie l'intensité magnétique d'une barre que l'on place dans le plan du méridien magnétique, dont on fait varier l'inclinaison depuis o jusqu'à 90 degrés, et que l'on tord d'un même nombre de degrés dans chacune de ses positions successives.

M. Baden-Powell a également vu qu'un fil de fer qui avait été aimanté étant droit, perdait une grande partie de son aimantation lorsqu'on le courbait.

D'après M. de Haldat (2), les vibrations sonores sont moins aptes à faire disparaître l'aimantation que ne le sont des chocs irréguliers; le même auteur ajoute l'observation suivante : « Si d'après le procédé de M. Gay-Lussac, on » tord des fils de fer auparavant magnétisés, ils conservent » le magnétisme qu'ils avaient avant la torsion. Si après » les avoir tordus on les tord en sens contraire, ils rede- » viendront parfaitement neutres. » On verra plus loin que ces deux assertions sont inexactes l'une et l'autre; évidemment M. de Haldat s'est laissé influencer par ses idées théoriques sur la force coercitive.

Depuis la découverte de l'induction, on a pu employer

---

(1) *Ann. de Gilbert,* tome LXXIII.

(2) *Annales de Chimie et de Physique,* tome XLII.

Digitized by Google

des hélices magnéto-électriques pour étudier les variations qu'éprouve l'état magnétique d'une barre placée dans l'axe d'une de ces hélices.

M. E. Becquerel s'est servi de ce moyen d'investigation dans un travail resté inédit (1) qu'il a bien voulu me communiquer postérieurement à la publication de ma première Note sur ce sujet. Un fil de fer doux est chargé d'un poids à son extrémité inférieure, et une partie de ce fil vertical est placée au centre d'une spirale dont le circuit comprend un galvanomètre; on observe un courant de même sens pour toutes les torsions, que celles-ci aient été effectuées dextrorsum ou sinistrorsum, et un courant de sens opposé pour toutes les détorsions quel que soit leur sens.

M. E. Becquerel attribue ces variations dans l'aimantation aux différences qui existent à cet égard entre les fers doux et écrouis, le fer tordu pouvant être assimilé à ce dernier, et cette explication a pu paraître satisfaisante, tant que l'on a opéré sous l'action continue du magnétisme terrestre.

Dans une lettre adressée à M. Arago, M. Matteucci (2) a publié quelques faits que je regrette de n'avoir pas cités lors de la publication de ma première Note; pour réparer cet oubli, et pour constater en même temps combien mes résultats diffèrent de ceux de M. Matteucci, je vais reproduire ici le passage tout entier de cette lettre qui se rapporte à notre sujet : « J'avais une spirale, » écrit M. Matteucci, « à fil très-fin et long, en communication » avec le galvanomètre, dans l'intérieur de laquelle était » le cylindre de fer doux ou d'acier qui était aimanté par » le courant d'une pile passant par une spirale à fil gros » et court, et qui avait aussi dans son intérieur les mêmes » cylindres, mais dans un autre point.... De la même ma- » nière, j'ai étudié l'influence des actions mécaniques telles

(1) Le seul titre de cette Note a été inséré dans le *Compte rendu* du 9 février 1845.

(2) *Comptes rendus*, tome XXIV, page 301.

Digitized by Google

» que la percussion ou la torsion sur un cylindre de fer » doux ou d'acier, opérées dans le même temps qu'il était » aimanté par le passage du courant ou de la décharge de » la bouteille. J'ai fait un grand nombre d'expériences » pour savoir si le degré du magnétisme était différent, » suivant que les molécules du fer ou de l'acier étaient » tordues ou dans le sens du courant ou en sens con- » traire; j'ai bien établi qu'il était le même dans les » deux cas. Quant à l'influence de la percussion ou de » la torsion sur le degré du magnétisme communiqué au » fer ou à l'acier par le courant, j'ai trouvé, comme » MM. Pouillet et Scoresby l'avaient fait pour l'action » magnétique de la terre, que les premiers coups ou les » premières torsions augmentent le magnétisme. Quand » le courant a cessé, ces mêmes actions produisent des » effets contraires, et il est remarquable que cette partie » du magnétisme qui se détruit ainsi est la même, soit » en agissant tout de suite après la cessation du courant, » soit après plusieurs jours.

» En continuant avec les mêmes actions mécaniques » appliquées à des intervalles de temps très-courts, l'une » après l'autre, sur le même fer aimanté par le courant, » ces actions cessent d'avoir le même effet. Voici un ré- » sultat qui m'a paru singulier. Le magnétisme acquis » par les mêmes actions de torsion, données successive- » ment soit dans un sens, soit dans le sens opposé, soit » alternativement, va toujours en diminuant; si l'on con- » tinue toujours, on voit apparaître les signes du magné- » tisme qui se détruit qui sont remplacés par des signes du » magnétisme qui s'accroît, et tous ces faits oscillent dans les » mêmes limites. Quand le courant a cessé de passer, ces » actions ne font que détruire le magnétisme d'une ma- » nière rapide.

» Ces résultats ont été obtenus de manière à être indé- » pendants de l'action magnétique de la terre. »

Digitized by Google

De mon côté, j'ai présenté à l'Académie, dans sa séance du 8 novembre 1852 (1), une Note dans laquelle j'énonçais les faits suivants :

1°. Tant qu'une barre de fer n'a pas atteint son état d'équilibre magnétique, les torsions et les détorsions agissent sur elle comme les autres ébranlements mécaniques : elles facilitent l'aimantation lorsque la barre vient d'être placée sous l'influence d'un courant ou du magnétisme terrestre, et elles facilitent la désaimantation lorsque cette influence vient d'être écartée ;

2°. Dans les deux cas et dès que l'équilibre magnétique est établi, que le fer soit ou non sous l'action d'une induction magnétique, toute torsion temporaire, quel que soit le sens dans lequel elle s'exerce, produit une désaimantation partielle du fer, tandis que la détorsion élastique lui restitue son aimantation primitive ;

3°. Lorsqu'une barre (ou un faisceau de fils) de fer a reçu une forte torsion permanente sous l'action soit du courant terrestre, soit de tout autre courant, toute torsion ou détorsion temporaire qui agit sur elle dans le sens de cette torsion permanente produit une aimantation partielle, et toute torsion ou détorsion qui agit en sens contraire produit une désaimantation (2).

---

(1) *Comptes rendus*, tome XXXV, page 702.

(2) M. Matteucci a cru voir dans ces faits la confirmation et le développement de ses propres expériences (*) ; dans l'ouvrage remarquable qu'il vient de publier (**), M. Matteucci s'exprime de la manière suivante : « Il » paraît naturel de considérer ces premiers résultats de M. Wertheim » (1 et 2) « comme conformes à ceux certainement plus complexes, auxquels » j'étais parvenu en opérant sur des barreaux d'un diamètre beaucoup plus » grand, ce qui ne m'a pas permis de distinguer suffisamment l'effet de la dé» torsion de celui de la torsion en direction contraire à celle qu'on a appli» quée premièrement au barreau ; la même raison m'a empêché de déterminer » le sens de la variation magnétique, qui correspond à la torsion du barreau

(*) *Comptes rendus*, tome XXXVI, page 742.

(**) *Cours spécial sur l'induction, le magnétisme de rotation, etc.*, p. 231.

Digitized by Google

XXVII. — Mes expériences ont été faites à l'aide de l'appareil que j'ai décrit dans la première partie de ce Mé-

» et à son retour à la position primitive.» En effet, la superposition des effets contraires de la torsion et de la détorsion explique les alternatives de périodes d'aimantation et de désaimantation que M. Matteucci croyait avoir observées, mais je suis obligé de faire remarquer que les différences entre nos résultats ne se bornent pas à ce seul point; sans parler de ce que M. Matteucci assimile constamment le fer à l'acier et la torsion qui est un simple dérangement de l'équilibre à une percussion qui se compose essentiellement de deux périodes, l'une de dérangement et l'autre de rétablissement de l'équilibre, le fait fondamental qui consiste dans la persistance des effets de la torsion et de la détorsion après l'interruption du courant qui a servi à aimanter la barre, ce fait qui seul exclut l'explication au moyen de la force coercitive, n'a pas été observé par M. Matteucci puisqu'il dit que « ces actions ne font alors que détruire le magnétisme d'une manière rapide. »

En ce qui concerne le troisième point de ma communication, M. Matteucci semble persister encore actuellement dans l'opinion qu'il avait émise antérieurement et qui consiste à nier qu'en aucun cas le sens de la torsion puisse avoir une influence quelconque sur le sens de la déviation de l'aiguille. Je reconnais moi-même que la Note succincte et seulement préliminaire qui a été insérée dans les *Comptes rendus* ne contenait pas les détails nécessaires pour qu'on pût répéter toutes mes expériences, détails que j'ai cru devoir réserver pour le présent Mémoire. Cependant j'y avais dit expressément que ce résultat s'obtient indistinctement avec des barres de fer ou avec des faisceaux de fils, et si j'ai parlé de ces derniers en cet endroit, ce n'a été que pour indiquer un moyen facile de vérifier les faits principaux sans être obligé de faire construire un appareil spécial pour la torsion.

Ayant voulu répéter cette partie de mes expériences, M. Matteucci trouve qu'il existe « une différence ou plutôt une opposition entre les résultats que l'on obtient avec des barres et ceux que donnent des faisceaux de fils; » ces derniers proviendraient alors « tout simplement du rapprochement plus » intime de ces fils par la torsion et de leur séparation produite par des » torsions en sens contraire. » Rien de semblable n'aurait lieu pour les barres. Mais dès la page suivante (page 233), M. Matteucci cite des expériences qu'il a faites sur des barres et qui prouvent précisément le fait qu'il vient de nier : « Lorsqu'un barreau de fer doux a été soumis à des torsions » croissantes jusqu'au point d'altérer son élasticité, s'il est alors soumis à » une très-faible torsion élastique toujours dans le même sens, on a généralement *augmentation* de magnétisme et la détorsion produit une *diminution* faible. » La même contradiction entre les résultats se reproduit plus loin (page 236) : « Il suffit de donner une torsion persistante pour obtenir » aussi la persistance dans la diminution de la force magnétique que le fil

Digitized by Google

moire, et dont le dispositif permet de tordre la barre dextrorsum ou sinistrorsum, de mesurer dans chaque cas les angles des torsions temporaires ou permanentes, de la laisser revenir en se détordant à sa position d'équilibre naturelle, ou enfin de la maintenir sous une torsion temporaire fixe, qu'il faudra avoir soin de ne pas confondre avec une torsion permanente. Toutes les fois que le contraire n'est pas expressément mentionné, les axes de l'appareil et de la barre étaient placés avec soin dans un plan perpendiculaire à celui du méridien magnétique.

La barre, en même temps qu'elle est dans l'axe de l'appareil, se trouve également dans l'axe de deux bobines dont l'une en gros fil, inductrice ou électromagnétique, reçoit le courant d'une pile, destinée à aimanter la barre, tandis que l'autre en fil plus mince comprend dans son circuit un galvanomètre sensible; cette seconde bobine est très-puissante et d'un diamètre intérieur assez considérable pour que les différences qui existaient entre les diamètres des barres fussent négligeables. Toutes les variations brusques qu'éprouve le magnétisme de la barre font naître des courants d'induction dont la grandeur et la direction sont indiquées par le galvanomètre. Les courants étant instantanés ne peuvent être mesurés que par les déviations impulsives de l'aiguille, lesquelles sont proportionnelles aux forces et très-suffisantes pour en faire connaître les lois. Chaque hélice n'occupe qu'une petite partie de la longueur de la barre et peut être déplacée parallèlement à l'axe de celle-ci; tous nos résultats sont indépendants de la place qu'occupent les deux bobines; nous obtenons la même déviation de l'aiguille, que l'hélice à induction soit placée

---

» peut acquérir temporairement sous l'action d'un courant électrique donné. » Il m'est arrivé d'observer un phénomène contraire lorsque je donnais à » un fil très-mince un grand nombre de torsions dans le même sens. »

Les faits contenus dans le présent Mémoire pourront servir, je crois, à lever tous les doutes et à faire disparaître ces contradictions.

Digitized by Google

sur la partie australe ou sur la partie boréale de la barre, ou même qu'elle se trouve sur la ligne neutre de manière à embrasser des longueurs égales sur les deux pôles opposés.

Il faut avoir soin que la barre aimantée n'ait pas de points conséquents; en effet, toutes les déviations de l'aiguille que nous obtiendrons plus loin changent de signe lorsque les pôles sont renversés, tout étant égal du reste. Cela était facile à prévoir, la modification qu'éprouve le magnétisme de la barre, quelle qu'elle soit, devant toujours faire naître des courants induits de sens contraire dans les deux cas. Supposons pour un instant que nous ayons encastré le bout boréal d'un aimant simple, que nous appliquions un couple à l'extrémité australe et que la torsion produise une diminution de l'aimantation, nous aurons une déviation dans un sens donné; maintenant retournons cet aimant bout pour bout ou, ce qui est la même chose, renversons le sens du courant inducteur, le pôle austral se trouvera maintenant encastré et le pôle boréal tordu, et la déviation produite par la torsion aura changé de signe, non que la torsion agisse sur le pôle austral autrement que sur le pôle boréal, mais uniquement parce que la position de l'aimant par rapport à la bobine à induction est changée et que la même diminution d'aimantation, ayant lieu dans les deux cas, fait naître dans le circuit de la bobine des courants égaux, mais de sens opposé.

Maintenant si l'aimant avait un point conséquent, on pourrait le considérer comme composé de deux aimants placés bout à bout, mais en position inverse; le même changement, dans leur aimantation, produirait donc dans la bobine deux courants opposés, que celle-ci recevrait simultanément si elle était placée dans le voisinage du point conséquent; et lors même qu'on a soin de n'opérer que sur une moitié de la barre, les phénomènes sont toujours moins nets qu'avec un aimant simple.

D'après ce que nous venons de dire, il devient inutile

Digitized by Google

d'indiquer chaque fois dans quel sens la barre se trouve aimantée; pour abréger le discours, nous appellerons *courant induit positif,* celui qui indique une augmentation dans l'aimantation de la barre, et *courant négatif,* celui qui provient d'une diminution, et nous les marquerons par les signes + et — placés devant le nombre de degrés de déviation. Nous pourrons également nous dispenser de parler séparément de ce qui arrive lorsque, au lieu de se servir d'un courant galvanique pour aimanter la barre, on emploie à cet effet le courant terrestre; les phénomènes restent les mêmes et les positions méridienne ou équatoriale équivalent, dans ce cas, à l'existence ou à l'interruption du courant inducteur.

Afin de m'assurer si la masse considérable de fer et de fonte, dont se compose mon appareil de torsion, n'aurait pas, d'une manière quelconque, vicié les résultats par son aimantation propre, j'ai eu soin de répéter toutes les principales expériences avec un appareil en bois, muni d'étaux en bronze; les résultats n'ont pas varié.

XXVIII. — Dans les recherches sur le magnétisme, on ne s'occupe ordinairement que du fer doux et de l'acier; au premier, on attribue une force coercitive nulle et au second une force coercitive absolue jusqu'à une certaine limite. Mais en réalité, ces deux substances ne doivent être considérées que comme les termes extrêmes d'une série, dans laquelle viennent se placer les fers de toute qualité; il n'existe pas de fer doux qui ne fixe d'une manière permanente une certaine quantité de magnétisme, et il n'y a pas d'acier qui ne perde une partie de l'aimantation qu'il est susceptible d'acquérir temporairement.

La persistance d'une première aimantation, qui n'est jamais détruite par des aimantations subséquentes appliquées soit dans le même sens, soit en sens opposé, a été démontrée déjà par les expériences de Réaumur et par celles plus récentes de M. Marianini; dans les deux cas, les

Digitized by Google

deux aimantations se superposent l'une à l'autre sans se détruire, et leur résultante constitue l'aimantation sensible ou apparente.

Nous avons dû chercher à distinguer dans les effets de la torsion que nous allons décrire, la partie qui provient de l'aimantation temporaire de celle qui est due à l'aimantation remanente; de cette manière seulement nous pourrons juger, au moins par induction, de l'effet magnétique que produirait la torsion dans une barre de fer parfaitement doux, et par conséquent dépourvue d'aimantation remanente, et de celui qu'elle produirait dans un fer neutre, qui n'aurait aucun magnétisme ni remanent ni temporaire.

Je commencerai par rapporter les expériences que j'ai faites sur un barreau de fer très-doux que M. Breguet a bien voulu faire forger et recuire à deux reprises différentes, en le faisant refroidir très-lentement. Jusqu'au moment de l'expérience, ce barreau carré, de 1 centimètre de côté, a été maintenu dans une position perpendiculaire au méridien magnétique et mis à l'abri de tout ébranlement mécanique. Ensuite on l'a placé dans le plan du méridien magnétique, à proximité d'une aiguille d'épreuve que l'on fit osciller sous l'influence simultanée des composantes horizontales du magnétisme de la terre et de celui du barreau; puis le barreau ayant été retourné bout pour bout et replacé dans la même position par rapport à l'aiguille, le nombre d'oscillations fut compté de nouveau. Ce nombre eût été le même dans les deux cas si le barreau n'avait eu aucune aimantation propre et distincte de celle qui provenait de l'induction terrestre.

Au contraire, on a obtenu les résultats suivants :

Digitized by Google

		Durée de 36 oscillations.		Moyennne.	Nombre d'oscill. pour 100°.
Sous la seule influence du magn. terr.		1'.49",6	1'.49",6	1'.49",6	$n = 32.847$
Le barreau étant horizontal.	1re position..	1.36,0	1.36,2	1.36,1	$n_1 = 37.461$
	Retourné.....	1.43,8	1.44.2	1.44,0	$n_2 = 34.615$
Le barreau étant parallèle à l'aiguille d'inclinaison.	Posit. conspir.	1.14,8	1.14,8	1.14,8	$n_1 = 48.128$
	Retourné.....	1.20,0	1.20.4	1.20,2	$n_2 = 44.888$

Soient maintenant m_1 et m_2 les forces directrices des magnétismes temporaire et remanent, on aura

$$\frac{m_1 + m_2}{m_1 - m_2} = \frac{n_1^2 - n^2}{n_2^2 - n^2} = C,$$

d'où

$$m_2 = \frac{C - 1}{C + 1} m_1.$$

Pour la position horizontale on a $C = 2{,}719$, et en mettant $m_1 = 1$ on trouve $m_2 = 0{,}462$. Ainsi donc, malgré les précautions que nous avions prises, ce fer avait conservé une aimantation presque égale à la moitié de celle qu'il est susceptible d'acquérir par l'influence de la composante horizontale du magnétisme terrestre ; et pourtant ce fer serait considéré habituellement comme parfaitement doux et neutre, puisque le retournement suffit pour renverser le sens de l'aimantation résultante.

Pour la seconde position, on trouve $C = 1{,}322$ et $m_2 = 0{,}139\, m_1$, ou, en combinant ces deux expériences avec l'une des précédentes, $m_1 = 4{,}897$ et $m_2 = 0{,}679$; ce dernier résultat n'est qu'approximatif, les actions du barreau n'étant pas rigoureusement comparables dans deux positions aussi différentes que celles-ci.

Maintenant le barreau, après avoir été encastré dans l'appareil en bois, placé au centre de la bobine à induction et ramené dans l'équateur magnétique, a été tordu à diffé-

Digitized by Google

rentes reprises et par des couples croissants, soit dextrorsum, soit sinistrorsum, sans que ni la torsion ni la détorsion aient jamais fait naître un courant d'induction sensible à l'aiguille de notre galvanomètre. Mais en opérant de la même manière, après avoir ramené dans le méridien les axes de l'appareil et du barreau, on a obtenu successivement les déviations suivantes :

Torsion dextr.	Détorsion.	Torsion sinistr.	Détorsion.
+ 3	+ 1	+ 2	0
— 1	+ 2	— 1,5	+ 1,5
— 1,5	+ 1,5	— 1,5	+ 1,5

On voit que les premières torsions ont permis au fer de recevoir par l'influence du magnétisme terrestre une nouvelle quantité de magnétisme, mais que chaque torsion a produit un courant négatif très-faible, et chaque détorsion un courant positif égal au précédent, dès que l'équilibre magnétique avait été établi, ce qui a eu lieu dans ce fer après deux torsions seulement. Voyons maintenant quelle était son aimantation dans ce nouvel état.

		Durée de 36 oscillations.	N. d'oscill. par 100″.	
Barreau horizontal.	Posit. conspir.	1′.26″,0	41.861	C : — 3.586; m_2 : 1.773 m_1;
	Opposée.	2. 0,6	29.851	m_1 : 1.094; m_2 : 1.941.
Parallèle à l'aiguille d'inclinaison.	Conspirante..	1. 4,6	55.728	C : 3.785; $m_2 = 0.582\, m_1$;
	Opposée.	1.29,6	40.179	m_1 : 5.774; m_2 : 3.361.

Ces valeurs absolues de m_1 et de m_2 ont été obtenues en combinant, comme nous l'avons déjà fait, chaque couple de résultats avec le premier de la série précédente ; elles font voir que l'aimantation temporaire n'a pas beaucoup varié : au contraire, l'aimantation remanente a augmenté par suite des torsions, à tel point que le renversement des pôles n'a plus lieu dans la position horizontale; seulement la résultante est de 3,035 lorsque les deux magné-

Digitized by Google

tismes s'ajoutent l'un à l'autre, et de 0,847 dans la position inverse. Au contraire, dans une position parallèle à l'aiguille d'inclinaison, ou même verticale, le retournement se fait encore avec la plus grande facilité, d'où il suit que l'on pourra trouver un angle d'inclinaison tel, qu'il y ait égalité absolue entre les deux aimantations, et qu'agissant en sens inverse ils fassent paraître le barreau parfaitement neutre.

Les expériences suivantes ont été faites à l'aide du grand appareil en fer et dans l'équateur magnétique, et l'on verra que le magnétisme de ce barreau a un peu augmenté par suite de l'influence du fer de l'appareil ; ensuite on a placé en face du pôle austral du barreau le pôle boréal d'un autre aimant, afin de voir si une influence de ce genre produirait quelque changement dans les déviations de l'aiguille ; enfin on a fait passer à travers la bobine inductrice d'abord le courant très-faible d'un petit élément de Daniell, et puis le courant d'un élément de Bunsen de grandeur ordinaire. Pour déterminer les intensités magnétiques lorsque l'équilibre magnétique était rétabli, on a replacé le barreau dans la même position, par rapport à l'aiguille d'épreuve, qu'il avait occupée dans les expériences précédentes, et l'on a tenu compte de l'action qu'exerce à cette distance la spirale lorsqu'elle est en communication avec la pile. Avec le courant de l'élément Bunsen, l'aimantation était tellement puissante, que l'aiguille placée à la distance ordinaire venait s'attacher au barreau ; le nombre d'oscillations a donc été calculé dans ce cas d'après une expérience faite à une distance trois fois plus grande entre les pôles du barreau et de l'aiguille ; à cette distance, l'influence de la bobine seule était insensible.

Digitized by Google

Courant très-faible.

	Durée de 36 oscillations.	N. d'oscill. par 100″.	
Avec la bobine seule.....	1′42″,0	35.294	$m_1 = 13.162 - i$;
Avec le barreau entouré de la bobine.....	0.36,4	98.901	
Avec le barreau seul.....	0.44,0	81.818	$m_2 = 25.307 - i$.

Courant d'un élément Bunsen.

Avec le barreau entouré de la bobine.....	″	264.190	$m_1 = 269.5 - i$;
Avec le barreau seul.....	0.36,0	100.000	$m_2 = 40.2 - i$.

Les aimantations faibles ont donc contribué à développer principalement l'aimantation remanente, mais à partir d'une certaine limite cette dernière ne prend que de faibles accroissements, quelle que soit du reste l'intensité de l'aimantation temporaire.

Des torsions égales entre elles et appliquées à ce barreau tandis qu'il était placé sous les différentes influences magnétiques que nous venons d'analyser, ont donné les résultats contenus dans le tableau suivant :

Digitized by Google

Distance entre les deux points d'encastrement.... $0^m,5$.

INFLUENCE MAGNÉTIQUE agissant sur le barreau en fer doux.	ANGLES de torsion.	DÉVIATIONS IMPULSIVES PRODUITES PAR LA Torsion dextrorsum. Torsion.	Torsion dextrorsum. Détorsion.	Torsion sinistrorsum. Torsion.	Torsion sinistrorsum. Détorsion.	OBSERVATIONS.
Le barreau vient d'être placé dans l'appareil en fer.	2.30	+ 3°	+ 1°	+ 2°	+ 1°	L'aimantation augmente légèrem.
	"	0	+ 2	− 2	+ 3	"
Aucune influence magnétique n'agit sur lui.	"	− 2	+ 2	− 3	+ 2	L'équilibre est rétabli.
	5.0	− 3	+ 4	− 5	+ 4	"
On approche du pôle austral du barreau le pôle boréal d'un aimant.	2.30	+ 6	+ 2	0	+ 2	L'aimantation augmente.
	"	− 2	+ 3	− 4	+ 4	Équilibre magnétique.
	5.0	− 5	+ 6	− 7	+ 7	"
On écarte cet aimant.....	"	− 7	+ 1	− 5	+ 3	Diminution d'aimantation.
Sans influence magnét. extérieure.	"	− 5	+ 3	− 4	+ 4	Équilibre magnétique.
Après quarante-huit heures.....	"	− 4	+ 2	− 3	+ 4	"
On fait passer à travers la bobine inductrice le courant d'un faible élément de Daniell.	2.30	+15	+ 5	+ 8	+ 3	Aimantation.
	"	+ 8	0	− 2	+ 4	"
	"	− 5	+ 4	−10	+ 6	Équilibre magnétique.
	"	−10	+ 7	− 9	+ 6	"
	5.0	−15	+ 9	−20	+14	"

Digitized by Google

[Suite.] **Distance entre les deux points d'encastrement... $0^m,5$.**

INFLUENCE MAGNÉTIQUE agissant avec la barre de fer doux.	ANGLES de torsion.	DÉVIATIONS IMPULSIVES PRODUITES PAR LA Torsion dextrorsum. Torsion.	Torsion dextrorsum. Détorsion.	Torsion sinistrorsum. Torsion.	Torsion sinistrorsum. Détorsion.	OBSERVATIONS.
On interrompt le courant.....	2.30′	− 16°	− 5°	− 11°	0°	Désaimantation.
Sans influence magnétique extérieure.	"	− 4	+ 4	− 5	+ 5	Équilibre magnétique.
	5.0	− 8	+ 8	− 9	+ 8	"
On fait passer le courant d'un élément de Bunsen.	2.30	+ 30	+ 12	− 5	+ 9	L'équilibre s'établit rapidement.
	"	− 13	+ 8	− 12	+ 8	"
	"	− 10	+ 10	− 12	+ 9	"
	5.0	− 20	+ 21	− 25	+ 23	"
On interrompt le courant.....	2.30	− 46	0	− 15	+ 6	Désaimantation.
Sans influence magnétique extérieure.	"	− 15	+ 6	− 11	+ 6	"
	5.0	− 24	+ 12	− 16	+ 12	Équilibre.
Après quarante-huit heures sans influence magnétique extérieure.	2.30	− 10	+ 7	− 9	+ 6	"
	5.0	− 18	+ 12	− 15	+ 12	"
	7.30	− 26	+ 20	− 22	+ 17	"

Digitized by Google

Quoiqu'elle soit faite sur un seul barreau, cette série d'expériences nous permet déjà de considérer comme établies les propositions suivantes : L'action mécanique de la torsion ou de la détorsion est insuffisante à elle seule pour aimanter le fer, ou, selon l'expression usitée, pour séparer les deux fluides; c'est ce que l'on pouvait supposer d'avance, puisqu'il n'y aurait aucune raison pour qu'une moitié de la barre devînt plutôt australe que boréale.

Lorsqu'il est placé sous une influence magnétique quelconque, les torsions rendent le fer doux susceptible d'acquérir et de fixer d'une manière permanente une quantité de magnétisme beaucoup plus considérable qu'il n'en pourrait acquérir si son équilibre mécanique n'avait pas été dérangé; à cet égard les torsions agissent comme d'autres ébranlements mécaniques. Dès que le fer a acquis toute l'aimantation, temporaire et remanente, qu'il est capable de prendre sous l'action d'un aimant extérieur donné, toute torsion que l'on exerce sur lui fait diminuer son aimantation totale, tandis que la détorsion correspondante la rétablit. Lorsque l'on soustrait ce fer à l'action magnétique extérieure, les torsions et les détorsions, de même que les autres ébranlements, font disparaître rapidement l'aimantation temporaire, mais elles continuent indéfiniment à exercer leur effet sur l'aimantation remanente qui est diminuée par les torsions et rétablie par les détorsions.

L'effet de la torsion est généralement plus grand que l'effet opposé de la détorsion; cette différence provient peut-être de la rapidité avec laquelle s'opère la torsion sous l'action d'un poids qui, généralement, fait que la barre dépasse même sa nouvelle position d'équilibre.

Quel que soit l'état magnétique de la barre, pourvu que ce soit un état d'équilibre, tous les effets de la torsion sont proportionnels aux angles de torsion; mais la grandeur de ces effets paraît dépendre beaucoup plus de la grandeur de l'aimantation remanente que de celle de l'aimantation

Digitized by Google

temporaire; en effet, pour n'en citer qu'un exemple, l'interruption du courant de l'élément Bunsen a fait perdre au barreau son aimantation temporaire qui était égale à plus de six fois l'aimantation remanente, tandis que les effets magnétiques de la torsion n'en ont pas même été réduits à moitié.

XXIX. — Il importe maintenant d'examiner quelle est l'influence de la matière de la barre ; à cet effet, je vais inscrire dans le tableau suivant une série d'expériences que j'ai faites avec quatre cylindres de 1 centimètre de diamètre environ ; ils ont été aimantés par le courant d'un même élément Bunsen (grand modèle) passant à travers la même bobine d'induction.

Digitized by Google

Distance entre les points d'encastrement.. 1 mètre.

SUBSTANCE.	ANGLE de torsion.	APRÈS LA FERMETURE DU CIRCUIT INDUCTEUR				APRÈS L'INTERRUPTION DU CIRCUIT.			
		Torsion dextrorsum.		Torsion sinistrorsum		Torsion dextrorsum.		Torsion sinistrorsum.	
		Torsion	Détorsion.	Torsion	Détorsion.	Torsion	Détorsion,	Torsion	Détorsion.
	° ′								
	7.10	>+90	+90	− 3	+90	>−90	−35	−75	+ 2
	"	−10	+80	−25	+72	−58	+14	−45	+18
Fer doux.....	"	−41	+65	−51	+59	−33	+22	−25	+24
	"	−53	+54	−53	+55	−26	+24	−25	+25
	14.20	>−90	>+90	>−90	>+90	−59	+38	−50	+44
	"	"	"	"	"	−52	+47	−51	+48
	5.10	>+90	+80	+80	+75	>−90	−55	−90	−38
	"	+48	+60	+30	+52	−72	−19	−47	0
	"	+18	+32	+ 2	+28	−38	+ 4	−28	+ 9
Fer demi-dur...	"	− 5	+24	−16	+22	−19	+12	−16	+15
	"	−20	+20	−23	+20	−17	+16	−16	+15
	10.20	−42	+55	−35	+57	−42	+30	−35	+32
	"	−46	+50	−48	+46	"	"	"	"
	1.20	>+90	+25	>+90	+30	−80	−38	−72	−26
	"	+65	+20	+40	+10	−55	−19	− 6	− 6
	"	**Après un grand nombre de torsions doubles.**							
	"	− 4	0	− 3	+ 7	−10	+ 5	− 9	+ 6
Fer dur.....	"	− 7	+ 8	− 6	+ 7	− 6	+ 5	− 7	+ 6
	2.40	+14	+12	−15	+17	−12	+15	− 8	+12
	"	−16	+16	−15	+16	−11	+13	−10	+12
	4. 0	−18	+20	−22	+24	−15	+17	−16	+17
	8.30	>+90	>+90	+80	+62	>−90	−80	>−90	−44
	"	+80	+48	+40	+19	−67	−28	−39	−14
Acier fondu non	"	+32	+25	+16	+ 7	−51	−20	−18	− 5
trempé.....	"	+10	+ 2	+12	0	−14	0	−15	0
	"	+ 6	0	+ 2	+ 1	0	0	0	0
	"	+ 2	0	0	0	"	"	"	"
	"	0	0	0	0	"	"	"	"

Digitized by Google

Ce tableau nous fournit quelques nouveaux résultats : on y voit d'abord que la marche est la même pour les fers de différentes qualités; les différences sont seulement quantitatives ; plus le fer est dur, plus il faut de torsions pour lui faire prendre ou perdre son aimantation temporaire, et pour le constituer à l'état d'équilibre magnétique; ce dernier est indiqué par l'égalité des courants opposés produits par la torsion et par la détorsion correspondantes ; on remarquera même que cet équilibre, quoique établi pour des torsions d'une certaine grandeur et d'un certain sens, peut ne pas exister encore ou n'exister que d'une manière incomplète pour des torsions plus grandes ou de sens opposé. Ce fait est bien plus saillant lorsque l'on commence par appliquer plusieurs torsions successivement dans le même sens, par exemple dextrorsum, au lieu de les faire alterner, comme nous venons de le faire : après un nombre suffisant de torsions, on arrive à l'égalité des déviations ; si maintenant on donne une torsion en sens opposé ou sinistrorsum, on obtient une déviation généralement considérable du signe + ou —, selon que le fer se trouve dans une période d'aimantation ou de désaimantation, mais ensuite l'équilibre s'établit rapidement. Remarquons encore que les différences entre les déviations, que l'on obtient dans les deux états d'équilibre magnétique, sont d'autant moindres que le fer est plus dur, tout étant égal du reste.

Mais entre le fer et l'acier, il y a une différence fondamentale : l'acier s'aimante graduellement, et, selon sa trempe, plus ou moins lentement; il se désaimante partiellement de la même manière. Dans les deux cas, les torsions accélèrent l'établissement de l'équilibre; mais une fois établi, cet équilibre est stable dans les deux cas aussi, et ne peut plus être dérangé par la seule torsion sans l'aide d'une influence magnétique.

XXX. — Il serait inutile de rapporter en détail un plus grand nombre d'expériences de ce genre; les épo-

Digitized by Google

ques d'aimantation et de désaimantation n'offrent rien de particulier, et dès qu'un état d'équilibre est établi, les quatre déviations sensiblement égales entre elles en valeur absolue, sont proportionnelles aux angles de torsion temporaires ; cette loi n'est vérifiée du reste qu'au degré d'exactitude près dont les expériences de ce genre sont susceptibles.

Actuellement nous pourrons donc nous borner à inscrire dans le tableau suivant, l'angle moyen de déviation qui correspond à une torsion ou à une détorsion quelconques de 1 degré par mètre de longueur.

Digitized by Google

NUMÉRO.	SUBSTANCE.	FORME ET DIMENSIONS de la section transversale.	COURANT INDUCTEUR fourni par	DÉVIATION MOYENNE PRODUITE PAR UNE TORSION DE 1 DEGRÉ PAR MÈTRE. Pendant le passage du courant.	Après l'interruption du courant. Immédiatement.	48 heures après.	Apr. plusieurs semaines.
				°	°	°	°
1	Fer très-doux (1)...	Carré, côté.... mm 10,00	1 élém. Daniell.....	1,52	0,86	"	"
			1 élém. Bunsen (petit modèle)..	2,12	1,75	1,53	"
2	Fer doux.....	Cercle, diamèt. 20,00	1 élém. Daniell.....	8,3	5,4	3,6	2,1
			1 élém. Bunsen (grand modèle).	16,3	9,9	7,2	7,5
3	Fer doux.....	Cercle, diamèt. 16,44	1 élém. Daniell.....	4,2	2,1	"	"
			1 élém. Bunsen (grand modèle).	13,9	8,0	4,3	3,2
4	Fer doux.....	Cercle, diamèt. 11,00	1 élém. Bunsen (petit modèle)..	7,5	3,5	2,9	1,9
			1 élém. Bunsen (grand modèle).	>13,0	7,1	"	3,7
5	Fer demi-dur.....	Cercle, diamèt. 10,50	1 élém. Bunsen (petit modèle)..	4,4	3,1	"	1,6
			1 élém. Bunsen (grand modèle).	6,5	5,1	"	3,9
6	Fer dur.....	Carré, côté.... 24,78	..... Id.....	10,0	6,8	"	"
7	Fer dur.....	Carré, côté.... 15,00	1 élém. Bunsen (petit modèle)..	5,4	6,0	5,1	4,2
			1 élém. Bunsen (grand modèle).	6,8	"	4,8	"
8	Fer dur.....	Cercle, diamèt. 10,38	..... Id.....	5,5	4,2	"	"
9	Fer dur.....	Rectang., côtés. 24,12 / 7,97	..... Id.....	4,6	"	4,0	"
10	Fer dur.....	Rectang., côtés. 23,90 / 3,94	..... Id.....	3,1	2,0	"	"
11	Acier fondu.....	Cercle, diamèt. 10,11	..... Id.....	0	0	0	0
12	Acier fondu.....	Ellipse, axes... 19,80 / 5,01	..... Id.....	0	0	"	0
13	Acier Huntsman...	Rectang., côtés. 27,28 / 6,03	..... Id.....	0	0	"	

(1) On s'est servi pour ce barreau d'une spirale aimantante beaucoup moins forte que pour les pièces suivantes.

Digitized by Google

Ce tableau non-seulement confirme les résultats que nous avons déjà signalés, mais en outre il fait voir que les effets de la torsion diminuent avec le temps, et à mesure que le fer perd une partie de son aimantation ; cette diminution, comme on devait s'y attendre, est plus rapide dans le fer doux que dans le fer dur ; cependant elle semble atteindre une limite, car, plus de six mois après leur aimantation, des fers de toute qualité induisaient encore des courants très-sensibles lorsqu'on les tordait.

Je dois faire remarquer ici une anomalie que j'ai observée plusieurs fois et qui me semble tout à fait inexplicable : elle consiste en ce que les fers durs donnent souvent, immédiatement après l'interruption du courant, des déviations plus fortes qu'ils n'en avaient fourni tant que le courant passait ; dans ces cas la diminution ne se fait sentir qu'après quelque temps.

La forme de la section paraît n'avoir aucune influence, mais les déviations augmentent avec la masse du fer et avec l'intensité de son aimantation, tout étant égal du reste.

J'ai vainement essayé d'obtenir des déviations sensibles par la torsion des substances diamagnétiques ; cette force étant, dans toutes les substances connues, très-faible par rapport à la force magnétique du fer, et les substances qui en sont douées au plus haut degré étant très-cassantes, il faudrait employer probablement des piles très-énergiques pour que l'effet pût devenir sensible ; ces expériences mériteraient d'être tentées, car elles me sembleraient de nature à éclaircir la question du diamagnétisme.

XXXI. — Dans toutes les expériences qui précèdent, nous sommes parti de la position d'équilibre que la barre occupe lorsque aucun couple tordant ni aucune autre force extérieure n'agit sur elle ; elle se trouvait dans cette position toutes les fois que nous avons fermé ou ouvert le circuit aimantant, ou que nous l'avons aimantée d'une manière quelconque ; c'est également à partir de cette position

Digitized by Google

que nous pouvons désigner comme celle du *zéro mécanique*, que nous avons appliqué vers la droite et vers la gauche de l'observateur des torsions égales entre elles et toujours assez faibles pour que la torsion permanente ait pu être considérée comme négligeable.

Nous avons trouvé que le *maximum de l'aimantation* correspond à cette position d'équilibre primitive. Maintenant on peut se demander si cette coïncidence est le résultat d'une relation quelconque entre des forces moléculaires et magnétiques, ou bien si elle provient de notre manière d'opérer ? Il nous sera facile de résoudre cette question : à cet effet nous commencerons par donner à la barre une torsion temporaire quelconque, nous l'aimanterons dans cette nouvelle position d'équilibre, et puis nous rechercherons s'il existe encore une position qui corresponde au maximum d'aimantation, et, dans le cas où elle existerait, si elle coïncide toujours avec le zéro mécanique ?

Ensuite, et tout en laissant le courant aimantant circuler autour de la barre, nous imprimerons à celle-ci de fortes torsions permanentes, soit dans un sens, soit dans l'autre, pour voir quelle influence ces déplacements permanents exercent sur la position de ce maximum.

Enfin, que la barre ait été ou non tordue d'une manière permanente, nous interromprons le courant, tandis qu'elle se trouvera sous l'action d'un couple tordant, et nous rechercherons de nouveau la position du maximum de son aimantation remanente.

Il est inutile sans doute de rappeler que nous n'avons plus à nous occuper de l'acier dont l'aimantation ne varie pas avec la torsion, et qui n'a pas par conséquent une position fixe de son maximum magnétique.

1. Supposons, pour fixer les idées, que les cordes de l'appareil soient disposées de manière à former un couple qui tende à tordre la barre vers la droite de l'observateur, que l'on y ait suspendu les poids nécessaires pour que cette

Digitized by Google

torsion soit de 5 degrés, et qu'ensuite on ait fermé le courant aimantant : laissons agir ce courant pendant un temps suffisant pour que l'équilibre magnétique puisse s'établir, et si le fer n'est pas très-doux, facilitons son aimantation par des ébranlements quelconques sans faire varier l'angle de torsion. Voici maintenant ce qui devra arriver dès que l'équilibre sera établi : si la position du maximum dépend de l'arrangement moléculaire qui existe au moment de l'aimantation, ce maximum se trouvera à 5 degrés vers la droite du zéro mécanique; par conséquent, lorsque nous enlèverons les poids pour laisser la barre se détordre de 5 degrés à o, cette détorsion mécanique sera une véritable torsion par rapport au magnétisme, elle équivaudra au dérangement magnétique qui aurait lieu si nous portions la torsion de 5 à 10 degrés dextrorsum ; elle devra donc, dans l'hypothèse que nous avons admise pour un instant, induire un courant du signe —. C'est le contraire qui a lieu quelle que soit du reste la qualité du fer et quelles que soient les torsions permanentes qu'il ait reçues avant son aimantation ; on observe toujours des courants dont les signes sont : — de 5 à 10, + de 10 à 5, + de 5 à o, et — de o à 5. Par conséquent, si, au lieu de prendre pour point de départ cette torsion initiale de 5 degrés, on applique les torsions de part et d'autre du zéro mécanique, on retrouve l'ancienne série : — + — +.

En d'autres termes, quel que soit l'arrangement des fibres du fer avant son aimantation, et quelle que soit sa torsion temporaire au moment de son aimantation, *le maximum coïncide toujours* avec la position qu'il occupe lorsque aucun couple tordant n'agit sur lui ou *avec le zéro mécanique.*

2. Nous venons de prouver que les torsions permanentes qui ont précédé l'aimantation et les torsions temporaires qui l'accompagnent n'exercent aucune influence ; voyons maintenant quel est l'effet des torsions permanentes

Digitized by Google

lorsqu'on les applique pendant que le fer se trouve sous l'action du courant aimantant. On observe alors le déplacement du maximum que nous avons vainement recherché tout à l'heure, et que nous désignerons sous le nom de *rotation du maximum*, nom qui est la simple expression du phénomène sans impliquer aucune idée théorique sur son origine ; ce déplacement angulaire a lieu dans le sens de la torsion permanente, mais sa grandeur ou *l'angle de rotation* varie selon la qualité du fer.

Supposons que l'on continue l'expérience précédente : la barre est placée sous l'action du courant, mais, au lieu de lui faire subir des torsions temporaires de 5 degrés, comme nous venons de le faire, appliquons-lui un couple assez fort pour que l'angle total de torsion soit d'une demi-circonférence vers la droite, puis enlevons le couple et supposons que la barre se détord de 20 degrés ; elle aura donc éprouvé une torsion dextrorsum permanente de 160 degrés, et une autre temporaire de 20 degrés. Je dis que le point maximum du magnétisme aura éprouvé par rapport au zéro de ce nouvel équilibre mécanique une rotation dont la valeur ne dépasse et n'atteint même jamais celle de l'angle temporaire, mais qui en approche d'autant plus que d'un côté le fer est plus dur, et que de l'autre côté la torsion permanente a été plus considérable.

On sait déjà comment on trouve la valeur de cet angle : on n'a qu'à chercher la position de la barre, à partir de laquelle des torsions temporaires quelconques font naître des courants du signe —, tandis que les retours à cette position donnent des courants du signe + : l'angle dont il faut tordre la barre pour l'amener de son équilibre mécanique à son équilibre ou maximum magnétique est l'angle de rotation cherché.

Ainsi donc, à partir de cette nouvelle position du maximum, les torsions vers la droite et vers la gauche produites dans le même ordre que ci-dessus, donnent constamment,

Digitized by Google

et quelle que soit leur grandeur, la succession de signes : — + — +. Mais on prévoit facilement ce qui doit arriver lorsque, sans connaître la vraie position de ce maximum, on prend pour origine des torsions un autre point quelconque, par exemple celui de l'équilibre mécanique ; toutes les torsions qui sont comprises dans l'angle de rotation donneront alors des courants positifs et les détorsions des courants négatifs, et cela uniquement parce que ces torsions mécaniques sont de véritables détorsions par rapport au nouvel équilibre magnétique (1). Dans l'exemple que nous avons choisi, supposons que l'angle de rotation soit de 10 degrés, et comptons les angles de torsion à partir du zéro mécanique, on aura les courants suivants :

	Tors. dextr.	Détors.	Tors. sinist.	Détors.
Pour tous les angles inférieurs à 10 degrés....	+	—	—	+
Pour tous les angles inférieurs à 20 degrés....	$\pm$	$\mp$	—	+
Pour tous les angles au-dessus de 20 degrés. .	—	+	—	+

Si la rotation avait été de a degrés sinistrorsum, on aurait :

Pour les angles $< a$...	—	+	+	—
» $< 2a$..	—	+	$\pm$	$\mp$
» $> 2a$..	—	+	—	+

Le double signe indique que le courant se compose de deux parties de signes opposés qui succèdent tellement rapidement l'un à l'autre, que l'aiguille ne marque que leur différence, laquelle passe du signe supérieur à l'inférieur à mesure que les angles grandissent ; en effet, en tordant dextrorsum dans le premier exemple, on aura de 0 à 10 un courant du signe +, et au delà de cette limite un courant du signe — ; si ces courants, ramenés à un angle de torsion

(1) C'est le fait que j'avais consigné dans ma première note (3) ; seulement on voit maintenant que j'ai été trop loin en disant que « toute torsion » qui agit dans le sens de la torsion primitive produit une augmentation dans l'aimantation ; cela n'est vrai que pour les torsions qui ne dépassent pas les limites de l'angle de rotation.

Digitized by Google

de 1 degré, étaient toujours d'égale intensité, on aurait pour toutes les torsions qui seraient plus grandes que de 10 degrés et plus petites que de 20 degrés, des déviations positives de plus en plus petites, l'aiguille resterait à zéro pour un arc de 20 degrés, et les déviations négatives ne l'emporteraient sur les positions que pour des arcs supérieurs à 20 degrés. Mais on remarque d'une manière générale que des déviations produites par des torsions qui sont comprises dans l'angle de rotation, sont toujours notablement plus petites que celles qui sont produites par des torsions de la même amplitude, mais qui tombent en dehors de ces limites et qui, dans l'exemple choisi, se trouvent à gauche du zéro mécanique ou bien à droite du maximum magnétique.

Nous aurons à revenir sur cette particularité, mais actuellement il suffit de remarquer que la déviation résultante décroît très-rapidement dès que l'angle de torsion dépasse celui de rotation, qu'elle est nulle pour une torsion moindre que du double de l'angle de rotation, et que passé cette limite elle devient négative.

La recherche de la vraie position du maximum n'offre donc aucune difficulté; seulement la précision de cette détermination dépend de l'intensité de l'aimantation et de la sensibilité du galvanomètre. Dans ces phénomènes, l'influence de la qualité du fer est des plus marquées : il est presque impossible d'obtenir par ce procédé aucune rotation sensible avec des barres de fer doux; au contraire, on y réussit facilement avec des fils de ce même fer doux. Cette différence provient uniquement de ce que la rupture a lieu dans les barres avant que la qualité du fer ait été pour ainsi dire modifiée par les torsions permanentes, tandis que les fils peuvent être tordus presque indéfiniment; je crois pouvoir recommander leur emploi pour la vérification de ces faits. On réussit avec un seul fil aussi bien qu'avec un paquet de fils, avec la seule influence terrestre aussi bien qu'avec le

Digitized by Google

courant aimantant d'une pile, pourvu que le galvanomètre soit assez sensible.

Mais dès que l'on se sert d'un fer dur, ou même demi-dur, on n'est plus obligé d'employer des torsions aussi considérables pour que la rotation devienne sensible ; citons-en quelques exemples :

QUALITÉ DU FER.	DIMENSIONS transversales.	ANGLE DE LA TORSION permanente.	ANGLE DE LA TORSION temporaire	ANGLE de rotation.
Demi-dur.....	Diamètre. 10,50	5°	15.12	6°
		180	18.20	8
		215	20.30	8
		360	23.10	10 1/2
Dur.....	24.78 s. 24.78	1/2	2.10	Insensible.
Dur.....	15.00 s. 15.00	20	11.37	4
		180	12.52	5 1/2
Dur.....	23.90 s. 3.94	9	45.50	10
		180	52. 0	13
		2 × 360	"	18

La rotation, on le voit, augmente avec les torsions permanentes, sans jamais atteindre la grandeur des torsions temporaires.

3. Il nous reste à examiner l'influence qu'exerce l'interruption du courant ; on comprend que cette influence est nulle lorsque la barre ne se trouve sous l'action d'aucun couple tordant au moment de l'interruption ; en ce cas, les barres de fer doux continuent à être dépourvues de rotation ; celles en fer dur dans lesquelles on a fait naître une certaine rotation sous courant, conservent cette même rotation après l'interruption ; toutes les déviations s'affaiblissent graduellement et les deux points fixes gardent leurs positions respectives. Mais il en est tout autrement lorsque la barre se trouve

Digitized by Google

temporairement tordue au moment de cette interruption ou plus généralement au moment où l'influence magnétique cesse d'agir sur elle : dans tous les fers, quelle que soit leur qualité, cette interruption produit une rotation du maximum dans le sens de la torsion temporaire; l'angle de rotation ne dépasse jamais l'angle de cette torsion, mais il en est d'autant plus rapproché que le fer est plus doux; dans les fers durs, la rotation produite par ce dernier procédé s'ajoute à celle qui peut avoir été produite par les torsions permanentes données sous courant, lorsqu'elles sont toutes deux de même sens, et elle s'en retranche dans le cas contraire.

Précisons les différences qui existent entre la rotation qui provient de l'interruption du courant et celle qui est produite par les torsions permanentes appliquées pendant que le courant subsiste : la première est d'autant plus forte que le fer est plus doux, tandis que la seconde existe presque uniquement dans le fer dur; la première disparaît dès qu'on rétablit le courant, tandis que la seconde est précisément liée à l'existence du courant; en revanche toutes les deux persistent indéfiniment après l'interruption, elles donnent l'une et l'autre des déviations de l'aiguille plus faibles pour les angles qui sont compris dans l'angle de rotation que pour ceux qui se trouvent en dehors de celui-ci; enfin l'une et l'autre ayant été détruites, la première par le rétablissement du courant et la seconde par la détorsion mécanique, se reproduisent plus facilement dans le sens primitif qu'en sens opposé.

Le tableau suivant fera bien comprendre la marche de ces phénomènes; nous y désignons par les lettres *d* et *s* les rotations dextrorsum et sinistrorsum et par le nom de rotations préexistantes celles qui ont été produites par des torsions permanentes; les angles de torsion et de rotation y sont comptés à partir du zéro mécanique, à moins que le contraire ne soit expressément indiqué.

Digitized by Google

N°s.	QUALITÉ DU FER.	ANGLE de torsion par 1 mètre de long.	DÉVIATIONS PRODUITES PAR LA Torsion dextrorsum. Torsion.	Torsion dextrorsum. Détorsion.	Torsion sinistrorsum. Torsion.	Torsion sinistrorsum. Détorsion.	ROTATION Totale.	Préexistante	Produite par l'interruption.	ANGLE de torsion sous lequel cette interruption a eu lieu.	OBSERVATIONS.
		° ′									
		5. 0	+10	− 7	−10	+ 8					
	●	10. 0	+15	−10	−24	+12	8° d.	0	8 d.	10. 0 d.	
		12.30	+ 8	− 5	−29	+16					
		16. 0	− 4	0	−36	+27					
		5. 0	+11	− 5	−12	+ 7					
1	Très-doux..	12. 0	+ 8	− 6	−30	+18	8 d.	0	8 d.	"	Après 48 heures.
		5. 0	−10	+ 8	− 9	+ 7					
		10. 0	−20	+20	−16	+15	0	0	0	"	Courant rétabli.
		5. 0	−14	+12	+12	−10					
		10. 0	−26	+16	+24	−17	13 1/2 s.	0	13 1/2 s	15. 0 s.	
		15. 0	−38	+25	+20	−13					
		2. 0	+40	−65	−45	+53					
		4. 0	+75	−70	−80	+90	5 d.	0	5 d.	6.40 d.	
2	Doux.....	4. 0	−70	+58	−64	+65	0	0	0	"	Cour. rétabli sous une torsion de 6° 40′.
		2. 0	−40	+18	+12	−34					
		4. 0	−62	+28	+48	−82	4 1/2 s.	0	4 1/2 s.	6.40 s.	

Digitized by Google

[illegible]	[illegible]	[illegible]	Déviations produites par la [illegible]				Rotation			Angle de torsion sous lequel cette interruption a eu lieu.	OBSERVATIONS.
			[illegible]		[illegible]		Totale	Préexistante	Produite par l'interrupt.		
			[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]					
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	3 ¹/₄ s.	0	3 ¹/₄ s.	4.30 s.	
		[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0	0	0	»	Cour. rétabli sous une torsion de 4° 30'.
		[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	6 d.	0	6 d.	7.10 d	
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	6 d.	»	5 d.	»	Après 24 heures
		[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	Courant [illegible]

N°.	QUALITÉ DU FER.	ANGLE DE TORSION par 1 mètre de long.	DÉVIATIONS PRODUITES PAR LA				ROTATION			ANGLE de torsion sous lequel cette interruption a eu lieu.	OBSERVATIONS.
			Torsion dextrorsum.		Torsion sinistrorsum.		Totale.	Restante.	Produite par l'interruption.		
			Torsion.	Détorsion.	Torsion.	Détorsion.					
		5°	−48	+38	+ 6	− 5	4° s.	0	4° s.	10° 20′ s.	
		7	"	"	− 5	+ 5					
		3	−20	+19	+16	−10					
		5	"	"	+24	−32					
		8	"	"	+40	−54					
	,	10	"	"	+45	−52	9 s.	0	9 s.	15.30 s.	
		12	"	"	+39	−35					
		15	"	"	+ 5	− 3					
5	Demi-dur. .	17	>−90	>+90	−12	+ 4					
		5	−38	+35	+48	−28					
		8	−66	+73	+55	−39	8 s.	0	8 s.	15.30 s.	Après 24 heures.
		10	"	"	+32	−25					
		10°20′ s.+2° (*)	"	"	+ 8	− 7					
		+5	"	"	+15	−11					
		12 30 s.+2	"	"	+ 6	− 5	14 s.	7 s.	7 s.	13 25 s.	
		15 0 s.−2	"	"	−10	+ 6					

(*) Il devient impossible de faire partir les torsions du zéro lorsque les rotations sont considérables, car on obtiendrait toujours des déviations de 90 degrés avant d'avoir atteint la position du maximum; dans ce cas on prend pour point de départ une torsion temporaire fixe qui est indiquée par le premier chiffre, le second indiquant la torsion à laquelle correspondent les déviations; en général, c'est cette méthode qui a servi pour la détermination des angles de rotation.

Digitized by Google

Nos.	QUALITÉ DU FER.	ANGLE DE TORSION par 1 mètre de long.	DÉVIATIONS PRODUITES PAR LA				ROTATION			ANGLE de torsion sous lequel cette interruption a eu lieu.	OBSERVATIONS.
			Torsion dextrorsum.		Torsion sinistrorsum.		Totale.	Préexistante.	Produite par l'interruption.		
			Torsion.	Détorsion.	Torsion.	Détorsion.					
		° ′									
		1 18	+10	− 6	−16	+ 7					
		2.38	+15	−14	−35	+16	2 1/2 d.	1 d.	1 1/2 d.	3. 0 d.	
		2.38 d. + 0.30	− 5	+ 5	"	"					
		5.20	+24	−20	"	"					
		7.50	+ 8	− 9		"	6 1/2 d.	5 d.	1 1/2 d.	3. 0 d.	
		2.38	+12	−20	−25	+25					
7	Dur.	4. 0	+45	−38	−59	+36					
		5.20	+57	−36	>−90	+68	6 1/2 d.	5 d.	1 1/2 d.	3. 0 d.	Après 24 heures.
		5.20 d. + 1	+ 4	0	"	"					
		6. 0 + 1	− 5	+ 2	"	"					
		1.18	+10	− 7	−12	+ 8					
		2.38	+15	−11	−32	+17					
		4. 0	+22	−16	"	"	4 1/2 d.	3 d.	1 1/2 d.	3.30 d.	
		4.0 + 1	− 8	+ 6	"	"					
9	Dur.....	2.30	−10	+11	− 8	+10	Insens.	0	Insens.	4.40	Après 24 heures.
		18	+25	−21	−62	+53					
"	Aw	18 + 7	− 7	+ 5	"	"	21 d.	18 d.	3 d.	20. 0 d.	
		18	+38	−26	−48	+35					
		18 + 7	− 6	+ 5	"	"	21 d.	18 d.	3 d.	"	Après

Digitized by Google

Il me reste à ajouter que la rotation ne se développe que dans la partie de la barre qui a été soumise au traitement mécanique ci-dessus décrit; dans toutes les parties non comprises entre les deux points d'encastrement, le maximum continue à coïncider avec le zéro, malgré qu'elles aient été aimantées par le même courant que cette partie intermédiaire.

XXXII. — On cherchera naturellement à rattacher les phénomènes que nous venons de faire connaître aux théories du magnétisme le plus généralement admises et nous allons les examiner à ce point de vue.

Les physiciens qui se sont occupés de l'influence qu'exercent sur l'aimantation les actions mécaniques, l'ont attribuée aux variations qu'éprouverait la force coercitive, force dont l'effet est, suivant la définition de Poisson, « d'arrêter » les particules de l'un et l'autre fluides dans la position » qu'elles occupent et de s'opposer ainsi à la séparation » des deux fluides et ensuite à leur réunion. » Dans cette hypothèse, lorsqu'on tord, fléchit ou frappe un fer doux, on lui donne une certaine force coercitive; lorsqu'on agit en sens contraire, on enlève cette force, les fluides se recomposent et le fer redevient neutre. Ici déjà restent inexpliqués les effets produits par de simples vibrations, qui ne sont accompagnées d'aucune déformation permanente : chaque vibration se composant de deux phases égales et opposées, on ne comprend pas pourquoi une barre qui a été mise en vibration tandis qu'elle était placée sous une influence magnétique, resterait plus fortement aimantée qu'elle ne l'eût été si son équilibre mécanique n'avait pas été dérangé. Mais négligeons pour le moment cette difficulté pour ne considérer que la torsion; on pourra jusqu'à un certain point expliquer les effets que l'on observe sous l'action inductrice : on dira que le fer tordu étant devenu un fer plus dur, ne fût-ce que temporairement, et par conséquent étant doué d'une force coercitive plus grande, est

Digitized by Google

incapable de recevoir une aimantation temporaire ou induite aussi considérable que dans son état d'équilibre, d'où proviendrait le courant négatif, tandis que la détorsion, en lui restituant sa qualité primitive, produit l'augmentation d'aimantation que l'on observe.

Cette explication est en contradiction avec la définition même de la force coercitive que nous venons de rappeler; car les fluides étant décomposés au moment où la torsion commence à agir, il faudrait admettre que leur tendance à se réunir, équilibrée par une force donnée, peut à son tour surmonter une force *plus grande* que celle-ci, ce qui est impossible.

En ce qui concerne les phénomènes qui ont lieu après l'interruption du courant inducteur, l'explication de l'effet de la torsion restera la même, mais comment expliquera-t-on celui de la détorsion? Comment comprendre en effet que le fer, une fois qu'il a perdu une certaine partie de son aimantation, puisse la reprendre sans qu'aucune influence magnétique agisse sur lui et que les portions des fluides qui se sont recomposées pendant la torsion puissent être de nouveau séparées par la seule action mécanique de la détorsion?

Enfin l'insuffisance de cette théorie devient évidente lorsqu'il s'agit d'expliquer les phénomènes de rotation : en partant de l'état d'équilibre et en tordant constamment dans un même sens, on obtient successivement deux courants de sens opposé, tandis que la force coercitive doit augmenter d'une manière continue.

Une autre explication a été proposée par M. Matteucci depuis la publication de mes premières expériences sur ce sujet : M. Matteucci attribue les changements dans l'aimantation aux changements de volume qu'éprouve le fer lui-même; ayant observé que le fer, lorsqu'il est *placé sous l'influence d'un courant*, augmente de magnétisme lorsqu'on l'allonge, M. Matteucci attribue cette augmentation

Digitized by Google

à l'augmentation de volume ou à la dilatation que le fer a éprouvée; le retour à l'équilibre en restituant au fer son volume primitif lui restituerait également son aimantation première; et puisque j'ai démontré que la torsion produit réellement une diminution de volume, on pourrait, quant à ces effets magnétiques, l'assimiler au raccourcissement; la détorsion deviendrait de même l'analogue de l'allongement.

J'ai répété et confirmé ces expériences de M. Matteucci : tant que le courant inducteur existe, l'allongement fait naître un faible courant positif et le retour à l'équilibre un courant négatif; mais ces variations *disparaissent avec le courant inducteur*.

On pouvait prévoir ce résultat de l'expérience, car si l'allongement avait continué à donner un courant positif après l'interruption même du courant inducteur, on aurait ainsi, et par une action purement mécanique, décomposé une partie des fluides et créé du magnétisme, ce qui n'était guère à présumer.

Dès lors l'hypothèse de M. Matteucci ne peut rendre compte d'aucun des phénomènes que nous avons observés après l'interruption du courant; la rotation est par sa nature même contraire à cette hypothèse; il ne reste donc plus qu'à voir si elle pourra servir au moins à expliquer les effets de la torsion sous courant lorsque la rotation est nulle. On comprendra facilement qu'il n'en est pas ainsi; en effet, nous avons fait voir dans la première partie de ce Mémoire que la diminution de volume est proportionnelle au carré de l'angle de torsion; donc si la diminution d'aimantation provenait de la diminution de volume, elle devrait également être proportionnelle au carré, tandis qu'elle est simplement proportionnelle à l'angle lui-même.

On arrive à la même conclusion en comparant entre elles les déviations qu'à égalité de changement de volume

Digitized by Google

on obtient au moyen de la détorsion et de la traction; ces dernières expériences sont délicates, non-seulement à cause de la faiblesse des déviations et de la difficulté que l'on éprouve à produire des allongements brusques sans trop d'oscillations, mais encore à cause de deux effets secondaires qui pourraient fausser les résultats.

L'une de ces causes d'erreur consiste dans le déplacement longitudinal qu'éprouvent toutes les sections de la barre par rapport à la spirale magnéto-électrique, déplacement qui est nul ou du moins infiniment petit dans la torsion, mais qui devient considérable lorsqu'il s'agit d'un allongement; ce déplacement agit sur l'aiguille absolument comme si l'on faisait mouvoir toute la barre aimantée dans l'intérieur de la bobine et parallèlement à son axe, et l'effet en est sensible lors même que l'on fixe cette bobine sur la barre elle-même. Mais la déviation de l'aiguille, en tant qu'elle provient de cette cause, change de signe selon que l'on applique la force à l'un ou l'autre pôle, tandis que la partie de cette déviation qui provient d'un changement dans l'aimantation conserve le même signe dans les deux cas; on peut donc trouver la valeur de cette dernière, corrigée de cette erreur, en prenant la moyenne entre les deux déviations que l'on observe lorsqu'on applique la même traction successivement aux pôles austral et boréal.

Il est beaucoup plus difficile de s'affranchir de la seconde cause d'erreur, qui consiste en ce que l'allongement est presque toujours accompagné d'une déflexion ou d'un redressement très-suffisants pour exercer eux-mêmes une action sur l'aiguille (1), car quelque soin qu'on prenne pour que la barre soit bien droite, on n'y arrive jamais

(1) La flexion exerce des effets magnétiques semblables de tout point à ceux de la torsion, la déflexion correspond à la détorsion, et même la rotation son analogue dans un déplacement de l'axe magnétique; je me réserve xposer ces faits dans un Mémoire spécial sur la flexion.

Digitized by Google

complétement; et lors même qu'on y réussirait, l'encastrement et le poids de la barre elle-même (placée horizontalement et dans l'équateur magnétique ainsi que ces expériences l'exigent) produiraient toujours une certaine flexion. Et en effet, on observe pour une traction donnée une déviation d'autant moindre que la barre (ou le fil) se trouve déjà plus allongée et mieux redressée par conséquent, et cette diminution est tellement sensible, que je n'oserais pas affirmer que l'allongement à lui seul agisse réellement sur l'aimantation.

Pour notre but, il suffit de démontrer qu'en aucun cas cette action ne peut servir à expliquer celle de la torsion; prenons l'exemple suivant : La barre de fer doux, n° 4, allongée par une traction de 30 kilogrammes, donne tout au plus une déviation de 6 degrés; l'allongement proportionnel de cette barre est alors

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{P}{E.\pi r^2} = \frac{30}{17800 \times 95,38} = 0,00001767,$$

d'où le changement de volume proportionnel

$$\frac{\Delta u}{u} = \frac{1}{3}\,\frac{\Delta L}{L} = 0,00000589.$$

Or, d'après les résultats contenus dans la première partie de ce Mémoire, nous pouvons calculer l'angle de torsion qu'il faudrait donner à cette même barre de 1 mètre de longueur pour obtenir le même changement de volume moyen; on aura

$$\psi = \frac{l}{r} \times \frac{180}{\pi} \left(\frac{\Delta u}{u}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{1000}{5,51} \times \frac{180}{\pi} \times 0,002427 = 25°,236,$$

et à cet angle correspondrait une déviation de l'aiguille de 328 degrés environ; ce résultat nous dispense de citer d'autres exemples analogues.

On pourrait être tenté d'attribuer tous ces effets à ce

Digitized by Google

que l'axe magnétique ne coïncide jamais rigoureusement avec l'axe de figure; en effet, la torsion fera généralement décrire au premier de ces axes une surface conique autour du second qui coïncide avec celui de la bobine; mais on peut se convaincre facilement que ce très-petit déplacement de l'axe magnétique ne produit aucun effet sensible, car l'aiguille bouge à peine lorsque, en laissant la barre immobile, on fait faire à l'axe de la bobine des angles de plus en plus grands avec l'axe magnétique, sans toutefois la déplacer dans le sens longitudinal.

La théorie d'Ampère ne rend pas mieux compte de nos phénomènes : les courants résultants des courants moléculaires sont, suivant cette théorie, parallèles entre eux et continus, et ils resteront tels quel que soit le déplacement qu'éprouvent, l'une par rapport à l'autre, deux tranches de la barre, voisines et infiniment minces, lors même que l'on admettrait que ces courants se déplacent avec les molécules matérielles et qu'ils sont entraînés par celles-ci; tous ces courants n'en resteront pas moins parallèles et conspirants, et il n'y a aucune raison ni pour que l'état magnétique de la barre soit changé, ni pour que la rotation de ces courants produise une nouvelle induction dans la spirale; aussi chercherait-on en vain à reproduire ces faits par la torsion d'un solénoïde.

XXXIII. — Toute tentative pour établir une théorie du magnétisme qui soit d'accord avec ces phénomènes semblera probablement prématurée; cependant il existe une hypothèse qui, sans être appuyée sur aucune preuve directe, s'est déjà tellement répandue et accréditée, et qui se rattache si naturellement à notre sujet, que je crois ne pas devoir la passer sous silence : je parle de l'hypothèse des vibrations. En ce qui concerne l'électricité, la rapidité de sa transmission, les faits analogues à une réflexion, et enfin la rotation électromagnétique du plan de polarisation, dé-

Digitized by Google

couverte par Faraday, ont tellement généralisé cette idée, que l'expression d'onde électrique a passé dans le langage ordinaire.

Nous ignorons quelle est la nature de ces vibrations électriques, mais si elles existent, le magnétisme pourra évidemment être ramené à ces mêmes vibrations, et la théorie d'Ampère subsistera tout entière. Admettons, en outre, que les molécules du fer entraînent avec elles leur atmosphère dans laquelle les vibrations ont lieu et par conséquent ces vibrations elles-mêmes; cette hypothèse sera facilement admise actuellement, puisque M. Fizeau a démontré que les molécules pondérables possèdent cette faculté par rapport aux vibrations lumineuses. Mais cette puissance d'entraînement, analogue au coefficient de correption de M. Beer ou à l'adhésion d'une partie de l'éther suivant M. Babinet, ne sera la même ni pour des fers de différentes qualités, ni pour les deux espèces de vibrations magnétiques, temporaires et permanentes; très-faible par rapport aux premières, elle sera très-grande par rapport aux secondes; il y aurait donc pour chaque fer à établir deux coefficients qui seraient nuls tous les deux pour l'acier.

Dans cet ordre d'idées, la force coercitive doit être remplacée par l'inertie de l'éther, qui s'oppose à l'excitation des vibrations régulières, de même qu'à leur extinction, et l'on comprend que dans les deux cas les vibrations moléculaires puissent contribuer à vaincre cette résistance; on comprend de même que lorsqu'une nouvelle aimantation vient s'ajouter à une aimantation préexistante, qu'elle soit de même sens ou de sens opposé, les deux espèces de vibrations se combinent d'après le principe de la coexistence des petits mouvements. Les vibrations préexistent discordantes et confuses autour des molécules du fer, comme dans un rayon de lumière naturelle, et l'aimantation qui, dans cette hypothèse, n'est autre chose que la polarisation de

Digitized by Google

ces vibrations, les rend concordantes entre elles. Nous ne ferons aucune hypothèse sur la nature de ces vibrations; mais qu'on les suppose rectilignes, elliptiques ou hélicoïdales, toujours est-il que le magnétisme total ou résultant pourra diminuer de deux manières : par la diminution de leur amplitude, ce qui a lieu lorsque le courant inducteur diminue d'intensité, ou par une discordance partielle entre les vibrations élémentaires elles-mêmes, discordance qui me semble être un effet inévitable de la torsion.

En effet, ici comme dans la théorie d'Ampère, on n'a à considérer que les courants résultants qui constituent le solénoïde; dans l'état d'équilibre de la barre, toutes les molécules qui sont situées sur une même parallèle à l'axe se trouvent constamment dans la même phase de vibration; en tordant la barre, on déplace d'un certain angle ces molécules correspondantes, et puisque le courant est entraîné par les molécules matérielles, cette même parallèle à l'axe devient le siége de vibrations partiellement discordantes, d'où résulte une diminution dans l'aimantation, proportionnelle à l'angle de torsion, ou du moins une diminution dans l'induction que cette barre peut exercer au dehors; la détorsion rétablit la concordance des vibrations et l'aimantation primitive. Ces effets devront se produire de la même manière pendant l'existence ou après l'interruption du courant inducteur, et c'est en effet ce qui a lieu; il ne peut y avoir qu'une différence quantitative qui dépend non-seulement du rapport entre les amplitudes des vibrations temporaires et persistantes, mais encore de la mesure dans laquelle ces deux espèces de vibrations participent au déplacement des molécules dans chaque espèce de fer.

La torsion appliquée avant l'aimantation produit cette même différence de phase entre les vibrations préexistantes, mais son effet ne devient sensible que lorsque celles-ci ont été polarisées par le courant inducteur.

Il est évident du reste qu'aucune discordance de ce genre

Digitized by Google

ne peut être produite ni par l'allongement ni par la compression.

Pour expliquer maintenant la rotation, il suffit d'admettre que les actions qui la font naître, la torsion permanente et l'interruption du courant, ont le pouvoir de faire disparaître les différences de phase existantes, de sorte que les vibrations deviennent concordantes pour une nouvelle position d'équilibre qui diffère de l'équilibre naturel en ce que chaque section a éprouvé un déplacement angulaire proportionnel à sa distance au point d'encastrement; dès lors, la détorsion mécanique devient, par rapport aux vibrations magnétiques, une véritable torsion qui doit induire un courant négatif, puisqu'elle dérange l'équilibre magnétique, et tous les autres faits que nous avons observés sont des conséquences faciles à prévoir du dérangement ou du rétablissement de ce nouvel équilibre. Cette non-coïncidence des axes mécanique et magnétique est tout à fait analogue à celle des axes mécanique et optique que j'ai observée dans certains cristaux du système régulier et dont la cause magnétique ou moléculaire nous est encore inconnue.

On peut même aller plus loin et admettre que cette nouvelle position d'équilibre n'existe que pour les vibrations persistantes qui sont pour ainsi dire fixées dans les molécules matérielles, tandis que les vibrations temporaires conservent leurs différences de phases; on comprendra alors pourquoi, pour tous les angles de torsion compris dans l'angle de rotation, les déviations de l'aiguille sont plus faibles que pour des angles égaux, mais situés en dehors des limites de la rotation : en effet, pour toute torsion comprise dans l'angle de rotation, les vibrations temporaires donnent un courant négatif et les permanentes un courant positif; l'aiguille ne marque que la différence de ces deux courants, différence qui peut même devenir nulle dans certains cas dont les expériences nous ont fourni des exemples; la même chose a lieu au moment de la détorsion,

Digitized by Google

seulement la différence des courants ou le courant résultant aura changé de signe. Mais en dehors de l'angle de rotation, l'aiguille indique non plus les différences, mais les sommes de ces deux courants. Cette même hypothèse explique pourquoi dans les fers durs doués de la rotation sous courant, celle-ci devient plus sensible après l'interruption du courant inducteur : l'aimantation temporaire ayant disparu, les déviations produites par les dérangements du nouvel équilibre ne peuvent plus éprouver aucune diminution, et restent les mêmes, que le dérangement du nouvel équilibre ramène la pièce vers son zéro mécanique ou qu'il l'en écarte.

Je crois que cette théorie, sans impliquer plus d'hypothèses arbitraires que les précédentes, est plus apte que celles-ci à rendre compte des phénomènes réels.

XXXIV. — Les faits que nous avons exposés dans ce travail interviennent dans plusieurs phénomènes cosmiques et pourront même recevoir d'utiles applications.

La terre est un corps à la fois élastique et magnétique; continuellement soumise à l'attraction des autres astres qui se combine avec les effets de la force centrifuge et avec la compression qui résulte de son refroidissement lent, mais continu, elle doit éprouver incessamment des changements de forme, qui ont été trop peu étudiés jusqu'ici pour qu'on puisse en déterminer la nature et la valeur, mais qui exercent nécessairement leur action sur l'aimantation propre et permanente de notre globe; il faudra en tenir compte dans la théorie des variations diurnes et annuelles de l'aiguille.

On objectera peut-être que la terre ne contient pas de fer à l'état métallique et que les substances magnétiques qui se rencontrent dans sa croûte solide peuvent être considérées comme douées d'une aimantation fixe et indépendante de l'action des forces mécaniques. Quelques expériences que j'ai faites avec de l'oxyde magnétique naturel ou fer aimantaire, m'ont prouvé que cette supposition ne serait

Digitized by Google

guère fondée : j'ai fait tailler deux lames, l'une dans une pierre d'aimant très-puissante, l'autre dans un fer aimantaire sensiblement neutre. Cette dernière s'aimante et prend des pôles permanents avec la même facilité que du fer métallique un peu dur; le renversement des pôles ne souffre non plus aucune difficulté et peut se répéter indéfiniment.

La première lame présente plus d'analogie avec l'acier qu'avec le fer; le renversement de ses pôles exige l'action d'un courant assez puissant, et elle est disposée à prendre un point conséquent au milieu de sa longueur, toutes les fois qu'on l'aimante contrairement à sa polarité préexistante; au contraire son aimantation augmente considérablement lorsqu'on fait agir le courant dans le sens de celle-ci. Ces lames étaient trop courtes et trop cassantes pour qu'on eût pu les tordre d'une manière sensible, mais il ne me semble pas douteux qu'à cet égard la lame neutre se serait comportée comme le fer.

Il est probable que tous les minéraux ferrifères et les roches magnétiques, si nombreuses d'après les recherches de MM. Delesse et Melloni, sont également influencées par l'action des forces mécaniques; il est certain du moins que leurs pôles éprouvent avec le temps des déplacements dont les causes sont restées inconnues jusqu'ici.

La constitution magnétique d'une contrée pourra donc être modifiée par des forces purement mécaniques; par exemple par une éruption volcanique qui ferait cesser l'état de dilatation ou de tension que cette partie de la croûte terrestre aurait éprouvée d'une manière temporaire.

On expliquera facilement maintenant l'influence que les tremblements de terre exercent sur l'aiguille aimantée, et qui a été constatée par Bernoulli, par Arago (1) et par MM. Cappocci et Gay; l'intensité de cette influence dé-

(1) *Œuvres*, tome IV, page 595.

Digitized by Google

pendra en chaque lieu de la composition des couches que les ondes parcourent. Que ces couches éprouvent une compression, une torsion ou une flexion, toujours est-il que chacun de ces effets sera immédiatement suivi d'un effet contraire, par suite de la rapidité avec laquelle ces ondes se propagent; l'aiguille ne peut donc pas être déviée d'une manière sensible, mais elle doit éprouver ces trépidations ou oscillations irrégulières que l'on a réellement observées.

L'augmentation de la capacité magnétique, s'il est permis de s'exprimer ainsi, qui est produite par l'allongement, quelque faible qu'il soit, explique ce fait connu depuis longtemps, qu'un fer à cheval que l'on charge graduellement à mesure qu'on l'aimante, acquiert une aimantation de plus en plus forte; lorsqu'on arrache cette charge, l'aimant se raccourcit et devient par cela même incapable de la porter de nouveau.

Qu'il me soit permis enfin de faire remarquer que ces faits se rattachent à une question qui préoccupe vivement les navigateurs. Dans ces dernières années, on a construit de grands navires, dont la coque ne contient presque que du fer et sur lesquels on avait fondé de grandes espérances; malheureusement ces navires ont été trouvés presque ingouvernables par suite des déviations imprévues et en apparence irrégulières qu'éprouvaient leurs compas; c'est même à cette cause que l'on attribue la perte de plusieurs de ces navires et notamment celle du *Teyleur*. On comprendra facilement maintenant qu'une masse de fer aussi considérable, aimantée par influence et incessamment fléchie et tordue par le mouvement des vagues, par l'action discordante de ses roues, par le mouvement de sa machine et par les déplacements de sa charge, doit éprouver dans la distribution et dans l'intensité de son magnétisme temporaire et permanent des fluctuations continuelles qui ne se reproduisent pas dans les compensateurs actuellement employés; dans ce cas, ces derniers ont donc le double incon-

Digitized by Google

vénient de ne pas remplir leur but et d'inspirer une fausse sécurité.

Il ne me semblerait pas impossible de remédier à ce grave inconvénient. Un premier moyen serait de construire en acier ou en fer aciéré toutes les parties voisines de la boussole et toutes celles qui sont le plus sujettes à être tordues ou fléchies; on s'affranchirait ainsi de l'action des forces mécaniques, en même temps que l'influence des variations d'intensité du magnétisme terrestre deviendrait moins sensible.

Si ce moyen n'était pas applicable dans la pratique, on pourrait, en se servant de la théorie de Poisson, essayer de remplacer les compensateurs actuels par des barres aimantées dont le fer serait le même que celui des parties actives du navire. Ces barres seraient, par leurs deux extrémités, reliées aux parois du navire au moyen de boulons en bronze, de manière à être solidaires avec celui-ci et à prendre part à tous ses changements de forme, tout en conservant leur état magnétique propre; leur action magnétique variable, mais constamment égale et opposée à celle du navire lui-même, pourrait, je crois, fournir une compensation complète; mais je dois me borner à appeler sur ces projets l'attention des personnes mieux placées que moi pour se livrer à ces utiles recherches.

Digitized by Google

RECHERCHES SUR UNE NOUVELLE CLASSE D'ALCOOLS;

PAR MM. AUG. CAHOURS ET A.-W. HOFMANN.

Mémoire lu à l'Académie des Sciences de Paris et devant la Société Royale de Londres.

En soumettant à la distillation sèche la glycérine, soit seule, soit additionnée de bisulfate de potasse ou d'acide phosphorique anhydre, M. Redtenbacher obtint un produit fort remarquable, auquel il donna le nom d'*acroléine*. Cette substance, qui présente tous les caractères d'une aldéhyde, et qui se rapproche par l'ensemble de ses réactions de l'aldéhyde vinique, se change sous l'influence des corps oxydants, et notamment de l'oxyde d'argent, en un acide qu'il désigna sous le nom d'*acide acrylique*, composé qui présente à l'égard de l'acroléine des rapports analogues à ceux que l'on observe entre l'acide acétique et l'aldéhyde ordinaire.

Les travaux publiés ultérieurement par MM. Will et Wertheim sur les essences d'ail et de moutarde, établirent entre ces composés et l'acroléine des relations qui devinrent plus manifestes encore par les recherches récentes et fort dignes d'intérêt de MM. Berthelot et de Luca. Ces chimistes, étudiant en effet l'action de l'iodure de phosphore sur la glycérine, obtinrent un composé liquide et volatil, d'une odeur irritante, renfermant de l'iode, dont la composition est exprimée par la formule C^6H^5I, et qu'ils désignèrent sous le nom de *propylène iodé*.

Cette substance se rattache, comme on le voit, aux combinaisons, propylène chloré C^6H^5Cl, propylène bromé C^7H^5Br, obtenues antérieurement par MM. Cahours, Reynolds et Hofmann, en faisant agir le chlore et le brome sur les gaz qui prennent naissance lorsque l'on soumet à la

Digitized by Google

température du rouge sombre soit l'alcool amylique ou l'acide valérianique, soit leurs différents homologues occupant dans l'échelle de ces composés des termes supérieurs. Un coup d'œil comparatif sur les formules des composés propyliques et sur celles des essences d'ail et de moutarde

Propylène chloré.....	$C^6 H^5 Cl$,
Propylène bromé.....	$C^6 H^5 Br$,
Propylène iodé.....	$C^6 H^5 I$,
Essence d'ail..... ...	$C^6 H^5 S$,
Essence de moutarde....	$C^6 H^5 S$, $C^2 Az S$,

montre évidemment que l'on peut admettre dans tous ces composés le même radical allyle $C^6 H^5$. Cette relation n'a pas échappé à M. Reynolds qui, dans son Mémoire publié il y a six ans, s'est prononcé clairement sur la probabilité de la transformation du propylène chloré et bromé par le sulfure et le sulfocyanure de potassium en essences d'ail et de moutarde (1).

Cependant la réalisation expérimentale de cette idée à une époque postérieure était réservée à MM. Berthelot et de Luca, et à M. Zinin. En effet, ces chimistes démontrèrent qu'en faisant réagir le propylène iodé sur le sulfocyanure de potassium ou sur le sulfocyanure d'argent, on produit une huile identique à celle que fournissent les semences de moutarde noire lorsqu'on les distille avec de l'eau.

L'admission d'un radical allyle $C^6 H^5$ semblable à l'éthyle $C^4 H^5$ établit une analogie parfaite entre les combinaisons dérivées du propylène et de la glycérine, et la série éthylique. Il suffit à cet effet de jeter un coup d'œil sur le tableau suivant :

---

(1) *Journal of the Chimical Society*, III, 1851.

Digitized by Google

Série éthylique.

Chlorure.....	$C^4 H^5 Cl$;
Bromure.....	$C^4 H^5 Br$;
Iodure.....	$C^4 H^5 I$;
Sulfure.....	$C^4 H^5 S$;
Sulfocyanure...	$C^4 H^5 S . C^2 Az S$;
Alcool.....	$C^4 H^6 O^2$;
Aldéhyde.....	$C^4 H^4 O^2$;
Acide..... ...	$C^4 H^4 O^4$.

Série allylique.

Chlorure.....	$C^6 H^5 Cl$;
Bromure.....	$C^6 H^5 Br$;
Iodure.....	$C^6 H^5 I$;
Sulfure.....	$C^6 H^5 S$;
Sulfocyanure...	$C^6 H^5 S, C^2 Az S$;
Alcool.....	$C^6 H^6 O^2$;
Aldéhyde.....	$C^6 H^4 O^2$;
Acide.....	$C^6 H^4 O^4$.

Il restait donc à trouver la clef de voûte de cet édifice, c'est-à-dire l'alcool auquel on pût non-seulement rattacher tous les composés précédents, mais duquel on pût encore faire naître une série de produits correspondant soit aux éthers simples, soit aux éthers composés, dérivés de l'alcool ordinaire. Après bien des tentatives, demeurées longtemps infructueuses par la facilité avec laquelle se décomposent ces corps, nous sommes parvenus à produire non-seulement l'alcool et l'éther de cette série, pour laquelle nous adopterons le nom de série *allylique*, mais en outre un grand nombre d'éthers composés. Pour arriver à ce résultat, nous avons fait réagir l'iodure allylique sur divers sels d'argent, espérant produire de la sorte par double décomposition de l'iodure d'argent et des éthers composés, d'où il nous fût possible ensuite d'extraire l'alcool. Presque tous les sels d'argent sont vivement attaqués par l'iodure allylique, mais il y a comparati-

Digitized by Google

vement peu de produits formés dans cette réaction qui puissent servir d'une manière convenable. Pour la préparation de l'alcool, le meilleur résultat nous a été fourni par la décomposition de l'oxalate allylique au moyen de l'ammoniaque.

Dans la Note que nous avons publiée (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, tome XLII, page 217) sur différents dérivés du propylène iodé, nous avions donné le nom de série *acrylique* à cette curieuse série de composés alcooliques, afin de rappeler les relations qui existent entre ces corps et l'acroléine. Nous préférons désigner sous le nom d'*allyle* le radical de ces combinaisons, qui s'accorde avec la nomenclature proposée par MM. Will et Wertheim, puis adoptée dans plusieurs Mémoires qui ont paru sur ce sujet depuis la publication de cette Note.

Dans l'action réciproque du propylène iodé et de l'oxalate d'argent desséché nous avons obtenu de l'iodure d'argent ainsi qu'une huile pesante, d'odeur aromatique, possédant tous les caractères d'un éther composé, qui n'est autre que l'oxalate allylique. Si l'on opère avec des matières sèches, l'action se fait mal, et l'on n'obtient aucun résultat net; si l'on ajoute au contraire à ce mélange de l'éther anhydre et que l'on opère dans un ballon muni d'un tube destiné à ramener les vapeurs condensées, la réaction s'accomplit facilement et d'une manière complète. En filtrant la liqueur éthérée, puis l'évaporant au bain-marie, l'éther distille en entier, tandis que l'on obtient pour résidu de l'oxalate allylique dont on achève la purification par une simple rectification.

Une fois que l'on s'est procuré ce composé, rien n'est plus facile que d'en isoler l'alcool allylique. Il suffit à cet effet de faire agir sur ce produit un excès d'ammoniaque sèche, on obtient de la sorte de l'oxamide et de l'alcool allylique, ainsi que l'exprime l'équation suivante :

Digitized by Google

$$\underbrace{C^2O^3, C^6H^5O}_{\text{Oxalate allylique.}} + AzH^3 = \underbrace{C^2O^2, AzH^2}_{\text{Oxamide.}} + \underbrace{C^6H^5O, HO}_{\text{Alcool allylique.}}.$$

Résultat entièrement calqué sur celui que fournit l'action réciproque de l'éther oxalique ordinaire et de l'ammoniaque :

$$\underbrace{C^2O^3, C^4H^5O}_{\text{Éther oxalique.}} + AzH^3 = \underbrace{C^2O^2, AzH^2}_{\text{Oxamide.}} + \underbrace{C^4H^5O, HO}_{\text{Alcool.}}.$$

L'alcool provenant de cette réaction n'est pas parfaitement pur, il retient toujours une petite quantité d'eau, et de plus il est saturé d'ammoniaque. Une simple rectification sur du sulfate ferreux suffit pour le débarrasser de ces impuretés. L'alcool allylique est un liquide incolore, très-mobile, doué d'une odeur piquante qui rappelle celle de la moutarde. Il bout à 103 degrés. Sa pesanteur spécifique est moindre que celle de l'eau. C'est un corps combustible qui brûle avec une flamme beaucoup plus lumineuse que celle de l'alcool ordinaire. Sa saveur est spiritueuse et mordicante. L'eau, l'alcool et l'éther le dissolvent en toutes proportions.

Soumis à l'analyse, ce composé nous a fourni les résultats suivants :

$0^{gr},182$ de matière ont donné 0,172 d'eau et 0,414 d'acide carbonique.

D'où l'on déduit, pour la composition en centièmes :

			Théorie.	
Carbone.....	62,08	C^6...	36	62,07
Hydrogène...	10,43	H^6...	6	10,34
Oxygène. ...	»	O^2...	16	27,59
			58	100,00

L'alcool allylique possède donc exactement la composition de l'aldéhyde propylique et de l'acétone dont il se distingue par toutes ses propriétés.

Digitized by Google

Le potassium attaque vivement l'alcool allylique, surtout si l'on élève un peu la température : de l'hydrogène se dégage en abondance, et l'on obtient une matière gélatineuse analogue à l'alcool potassé, dont la composition doit être exprimée, selon toute probabilité, par la formule

$$C^6 H^5 KO^2.$$

Ce dernier produit étant traité par l'iodure allylique s'échauffe fortement; de l'iodure de potassium se dépose en abondance, en même temps qu'il se forme un liquide incolore, volatil, très-mobile, plus léger que l'eau, complétement insoluble dans ce véhicule, et correspondant par sa composition et par ses fonctions à l'éther ordinaire. Ce composé, que nous désignerons sous le nom d'*éther allylique*, et qui bout vers 82 degrés, prend également naissance dans l'action réciproque de l'iodure allylique et des oxydes de mercure et d'argent. Les équations suivantes permettent d'expliquer facilement ces réactions

$$C^6 H^5 KO^2 + C^6 H^5 I = KI + C^{12} H^{10} O^2;$$
$$2 (C^6 H^5 I) + 2 HgO = 2 HgI + C^{12} H^{10} O^2.$$

En traitant l'alcool potassé par l'iodure allylique, ou bien l'alcool allylique potassé par l'iodure d'éthyle, il se forme de l'iodure de potassium, et l'on obtient un liquide incolore, aromatique, très-volatil, bouillant vers 64 degrés, qui n'est autre chose qu'un éther mixte renfermant à la fois les radicaux éthyle et allyle.

Le méthol potassé, l'amylol potassé et le phénol potassé fournissent des résultats analogues dans leur contact avec l'iodure allylique.

En distillant l'alcool allylique avec le chlorure, le bromure ou l'iodure de phosphore, on reproduit avec la plus grande facilité les éthers chlorhydrique, bromhydrique, et iodhydrique de cette série. L'éther iodhydrique obtenu par cette méthode possède toutes les propriétés du propy-

Digitized by Google

lène iodé, qui se produit dans l'action réciproque de l'iodure de phosphore et de la glycérine ; il en est de même à l'égard des chlorure et bromure d'allyle, et le propylène chloré et bromé.

L'alcool allylique se dissout sans coloration dans l'acide sulfurique au maximum de concentration, et donne un acide copulé formant avec la baryte, la strontiane et l'oxyde de plomb des sels solubles et cristallisables.

L'acide phosphorique anhydre attaque l'alcool allylique sous l'influence d'une douce chaleur. Il se dégage un gaz incolore, brûlant avec une flamme très-lumineuse, dont nous n'avons pas fait l'analyse. Selon toute apparence, sa composition doit être exprimée par la formule

$$C^6 H^4.$$

L'alcool allylique est promptement attaqué par les agents oxydants. Un mélange d'acide sulfurique et de bichromate de potasse agit sur ce corps avec une violence extrême. Les produits de cette réaction sont de l'acroléine et de l'acide allylique. Le noir de platine produit la même transformation. Enfin ce même alcool, traité par la potasse et le sulfure de carbone, donne un composé qui cristallise en belles aiguilles jaunes ressemblant au xanthate de potasse, et auquel probablement l'analyse assignera une formule analogue.

Éthers allylique, éthylallylique et amylallylique.

Lorsque l'on fait agir l'iodure allylique sur l'allylol potassé, on observe une réaction assez vive. Le résidu repris par l'eau lui abandonne de l'iodure de potassium, tandis qu'il se sépare une huile douée des caractères que MM. Berthelot et de Luca assignent au produit qui se forme dans l'action réciproque de l'iodure allylique et de l'oxyde rouge de mercure.

Remplace-t-on l'allylol potassé par de l'éthylate de

Digitized by Google

potasse, on obtient un produit semblable au précédent. C'est un liquide incolore, très-mobile, doué d'une odeur aromatique qui rappelle en même temps celle du raifort. Insoluble dans l'eau, ce produit se dissout facilement dans l'alcool et dans l'éther. Il bout à la température de 64 à 65 degrés. Soumis à l'analyse, ce composé nous a donné les résultats suivants :

$0^{gr},338$ de matière ont donné 0,352 d'eau et 0,864 d'acide carbonique.

D'où l'on déduit, pour la composition en centièmes :

			Théorie.	
Carbone....	69,69	C^{10}....	60	69,78
Hydrogène..	11,56	H^{10}....	10	11,63
Oxygène.....	»	O^2....	16	18,59
			86	100,00

La constitution de ce composé doit nécessairement être représentée par la formule

$$C^{10}H^{10}O^2 = \frac{C^6H^5O^2}{(C^4H^5)}.$$

L'iodure allylique donne avec l'amylate de potasse une huile limpide, volatile, insoluble dans l'eau, douée d'une odeur qui rappelle tout à la fois le raifort et l'alcool amylique. Ce produit, que nous n'avons pas analysé, possède selon toute vraisemblance la composition suivante :

$$C^{16}H^{16}O^2 = \frac{C^6H^5O^2}{(C^{10}H^{11})}.$$

Sulfure d'allyle (essence d'ail).

Lorsqu'on laisse tomber goutte à goutte de l'iodure d'allyle dans une dissolution alcoolique concentrée de monosulfure de potassium, il se manifeste une action très-vive, le liquide s'échauffe fortement, en même temps qu'il se forme un abondant dépôt cristallin d'iodure de potassium. Il est

Digitized by Google

important de n'ajouter l'iodure d'allyle que graduellement, sans quoi l'on aurait à craindre des projections qui feraient perdre une partie du produit. Dès que l'action cesse, on ajoute un léger excès de sulfure de potassium, et l'on étend d'eau : il se sépare alors une huile légère, jaunâtre, limpide, douée d'une très-forte odeur d'ail.

Rectifié, ce liquide devient incolore, bout à 140 degrés, et donne avec l'azotate d'argent un précipité cristallin soluble dans l'alcool affaibli bouillant et s'en séparant par le refroidissement sous la forme de belles aiguilles blanches, entièrement identiques à celles que forme l'essence d'ail naturelle.

Le sulfure d'allyle se comporte encore de la même façon que cette dernière avec le sublimé corrosif et le bichlorure de platine.

Soumis à l'analyse, le sulfure d'allyle nous a donné les résultats suivants :

0^{gr},420 de matière nous ont donné 0,338 d'eau et 0,975 d'acide carbonique.

Résultats qui, traduits en centièmes, conduisent aux nombres suivants :

			Théorie.	
Carbone.....	63,3	C^6... .	36	63,16
Hydrogène...	8,9	H^5 ...	5	8,78
Soufre.....	»	S.....	16	28,06
			57	100,00

Mercaptan allylique.

Lorsque dans la préparation précédente on remplace le monosulfure de potassium par le sulfhydrate de sulfure, on obtient un produit volatil d'une odeur analogue, mais plus éthérée, réagissant avec énergie sur l'oxyde de mercure, avec lequel il forme un corps qui se dissout dans l'alcool bouillant et s'en sépare par le refroidissement sous la

Digitized by Google

forme d'écailles nacrées douées de beaucoup d'éclat, qui présentent la plus grande ressemblance avec le mercaptide de mercure. Ce produit, qui bout à 90 degrés, présente une composition et un ensemble de propriétés qui le rapprochent du mercaptan fourni par l'alcool ordinaire : c'est le mercaptan allylique.

Soumis à l'analyse, ce composé nous a donné les résultats suivants :

I. $0^{gr},500$ de mercaptan allylique ont donné 0,371 d'eau et 0,896 d'acide carbonique.

II. $0^{gr},300$ d'un second échantillon ont donné 0,225 d'eau et 0,536 d'acide carbonique.

Résultats qui, traduits en centièmes, conduisent aux nombres suivants :

	I.	II.		Théorie.	
Carbone...	48,86	48,71	C^6...	36	48,65
Hydrogène.	8,23	8,30	H^6..	6	8,11
Soufre	»	»	S^2...	32	43,34
				74	100,00

Ce produit est vivement attaqué par l'acide nitrique avec dégagement de bioxyde d'azote; le liquide se colore en rouge à la manière du mercaptan éthylique en produisant un acide particulier analogue à l'acide sulféthylique, qui forme avec la baryte un sel cristallisé en écailles blanches et brillantes.

Acide sulfo-allylique.

Lorsqu'on ajoute par petites portions à l'alcool allylique environ son volume d'acide sulfurique monohydraté, le mélange s'échauffe sans se colorer sensiblement. Si l'on étend la liqueur acide d'à peu près sept à huit fois son volume d'eau, puis qu'on la neutralise par du carbonate de baryte en poudre fine, on obtient par l'évaporation une matière qui cristallise en lames d'un blanc éclatant.

Digitized by Google

Ce sel, qui se forme dans les mêmes conditions que le sulfovinate de baryte, fournit à l'analyse les résultats suivants :

$0^{gr},154$ de matière ont donné 0,087 de sulfate de baryte ;

ce qui représente 33,11 de barium et correspond à la formule

$$C^6 H^5 Ba S^2 O^6.$$

En effet, on a :

	Calcul.		Expérience.
C^6.....	36,0	17,54	»
H^5.....	5,0	2,43	»
Ba.....	68,5	33,33	33,11
S^2.....	32,0	15,55	»
O^6.....	64,0	31,15	»
	205,5	100,00	

Oxalate d'allyle et allyloxaméthane.

Nous avons vu précédemment dans quelles circonstances se forme l'oxalate d'allyle. Nous ne reviendrons pas sur sa préparation. Purifié par une simple rectification, ce composé se présente sous la forme d'un liquide incolore, limpide, plus pesant que l'eau, doué d'une odeur aromatique qui rappelle celle de l'éther oxalique. Il bout à la température de 207 degrés. Mêlé à l'eau, l'oxalate d'allyle se décompose spontanément au bout d'un certain temps; sa décomposition est beaucoup plus rapide lorsqu'on le fait bouillir avec une dissolution de potasse caustique. L'ammoniaque aqueuse l'attaque rapidement et le transforme en oxamide et en alcool allylique.

L'alcool ammoniacal employé avec précaution, de façon à empêcher la production de l'oxamide, produit une substance analogue à l'oxaméthane, et que, pour cette raison, nous désignerons sous le nom d'*allyloxaméthane*. Cette substance se sépare sous la forme de magnifiques cristaux

Digitized by Google

lorsqu'on soumet à l'évaporation la dissolution alcoolique. Le sodium attaque rapidement l'oxalate allylique, surtout à l'aide de la chaleur; de l'oxyde de carbone se dégage, tandis qu'il passe à la distillation une huile limpide, incolore, aromatique, plus légère que l'eau, qui n'est autre chose que le carbonate d'allyle.

L'analyse de l'oxalate allylique nous a fourni les résultats suivants :

I. $0^{gr},179$ d'une première préparation nous ont donné 0,0951 d'eau et 0,3695 d'acide carbonique.

II. $0^{gr},320$ d'un second échantillon nous ont donné 0,170 d'eau et 0,662 d'acide carbonique.

On tire de là, pour la composition en centièmes :

	I.	II.			Théorie.
Carbone...	56,31	56,40	C^6...	48	56,47
Hydrogène.	5,92	5,89	H^5..	5	5,88
Oxygène...	»	»	O^1..	32	37,65
				85	100,00

Allyloxaméthane.

L'analyse d'un échantillon d'allyloxaméthane parfaitement cristallisé nous a donné les résultats suivants :

$0^{gr},532$ de matière ont donné 0,266 d'eau et 0,903 d'acide carbonique.

Résultats qui, traduits en centièmes, conduisent aux nombres suivants :

				Théorie.
Carbone....	46,29	C^{10}...	60	46,51
Hydrogène..	5,55	H^7...	7	5,42
Azote.....	»	Az..	14	10,84
Oxygène....	»	O^6....	48	37,23
			129	100,00

Digitized by Google

Acétate d'allyle.

L'iodure d'allyle s'échauffe fortement par son contact avec l'acétate d'argent en donnant de l'iodure de ce métal, ainsi qu'un liquide d'une odeur aromatique qui se rapproche beaucoup de celle de l'éther acétique. Le produit obtenu de la sorte n'est pas pur; il retient toujours une certaine quantité d'iodure d'allyle dont on le débarrasse en lui faisant subir une ou deux nouvelles rectifications sur de l'acétate d'argent.

Ainsi préparé, l'acétate d'allyle est un liquide incolore plus léger que l'eau, doué d'une odeur aromatique et piquante, et bouillant entre 102 et 103 degrés. La potasse le décompose à la température de l'ébullition en donnant naissance à de l'acétate de potasse et régénérant de l'alcool allylique.

Soumis à l'analyse, ce composé nous a donné les résultats suivants :

I. $0^{gr},500$ de matière ont donné 0,370 d'eau et 1,10 d'acide carbonique.

II. $0^{gr},450$ du même produit ont donné 0,328 d'eau et 0,988 d'acide carbonique.

Ces résultats, traduits en centièmes, conduisent aux nombres suivants :

	I.	II.		Théorie.
Carbone....	60,00	59,87	C^{10}...	60,0
Hydrogène..	8,24	8,09	H^{8}...	8,0
Oxygène....	»	»	O^{4}...	32,0
				100,0

Butyrate d'allyle.

L'iodure d'allyle s'échauffe fortement par son contact avec le butyrate d'argent; si l'on distille ce mélange, on recueille un liquide de couleur ambrée qui devient incolore par la rectification. Ce liquide est huileux, très-lim-

Digitized by Google

pide, plus léger que l'eau, bout vers 140 degrés et possède une odeur qui rappelle celle de l'éther butyrique. La potasse en dissolution concentrée décompose rapidement cet éther sous l'influence de la chaleur en régénérant de l'alcool allylique et produisant du butyrate alcalin.

Soumis à l'analyse, ce composé nous a donné les résultats suivants :

I. $0^{gr},400$ de matière ont donné 0,345 d'eau et 0,966 d'acide carbonique.

II. $0^{gr},450$ du même produit ont donné 0,384 d'eau et 1,081 d'acide carbonique.

Ces résultats, traduits en centièmes, conduisent aux nombres suivants :

	I.	II.		Théorie.	
Carbone...	65,86	65,51	C^{14}...	84	65,60
Hydrogène..	9,58	9,48	H^{12}...	12	9,34
Oxygène....	»	»	O^{4}...	32	25,05
				128	100,00

Valérate d'allyle.

L'iodure d'allyle se comporte à l'égard du valérate d'argent de la même manière qu'avec le butyrate : action vive, production d'iodure d'argent et formation d'un liquide éthéré qu'on purifie par une nouvelle distillation sur du valérate, un lavage sur de l'eau alcalisée et la digestion sur du chlorure de calcium.

Purifié par de nouvelles rectifications, le valérate d'allyle est un liquide incolore doué d'une odeur aromatique qui rappelle celle de l'éther valérique. Il bout à 162 degrés. Sa pesanteur spécifique est moindre que celle de l'eau. Sa vapeur est inflammable et brûle avec une flamme éclairante. Insoluble dans l'eau, ce liquide se dissout facilement dans l'esprit-de-bois, l'alcool et l'éther.

Soumis à l'analyse, ce composé nous a fourni les résultats suivants :

Digitized by Google

0gr.384 de matière ont donné 0,350 d'eau et 0,949 d'acide carbonique.

Résultats qui, traduits en centièmes, donnent :

			Théorie.	
Carbone....	67,40	C^{16}...	96	67,60
Hydrogène...	10,12	H^{14}..	14	9,86
Oxygène....	»	O^{4}...	32	22,54
			142	100,00

Benzoate d'allyle.

Le benzoate allylique peut s'obtenir soit par l'action du chlorure de benzoïle sur l'alcool allylique, soit par l'action de l'iodure d'allyle sur le benzoate d'argent.

C'est un liquide limpide, de couleur ambrée, plus pesant que l'eau, dans laquelle il est insoluble, doué d'une odeur aromatique qui rappelle celle de l'éther benzoïque et bouillant à 228 degrés.

L'alcool, l'esprit-de-bois et l'éther le dissolvent facilement.

Une dissolution aqueuse de potasse le décompose à la température de l'ébullition en régénérant de l'alcool allylique et de l'acide benzoïque qui s'unit à l'alcali.

L'analyse du benzoate allylique nous a fourni les résultats suivants :

0gr,372 de matière ont donné 0,209 d'eau et 0,999 d'acide carbonique.

D'où l'on déduit, pour la composition en centièmes :

			Théorie.	
Carbone....	73,26	C^{20}...	120	74,07
Hydrogène .	6,24	H^{10}..	10	6,17
Oxygène....	»	O^{4}..	32	19,76
			162	100,00

Digitized by Google

Cyanate d'allyle.

Le cyanate d'argent est vivement attaqué, même à froid, par l'iodure allylique; la chaleur produite par la réaction est assez intense pour que le composé qui en résulte distille presque en entier. On obtient ainsi un liquide incolore, très-limpide, bouillant à 82 degrés, doué d'une odeur extrêmement pénétrante analogue à celle de l'éther cyanique, et qui produit le larmoiement à un haut degré. Ce composé s'échauffe légèrement lorsqu'on le mêle à l'ammoniaque, disparaît promptement, et la liqueur fournit par l'évaporation une magnifique substance cristallisée, qui n'est autre chose que l'urée allylique.

L'éthyliaque se comporte d'une manière analogue avec le cyanate d'allyle, et l'on obtient par l'évaporation une substance cristallisée en prismes qui est l'éthylallylurée.

Soumis à l'analyse, le cyanate d'allyle nous a donné les résultats suivants :

I. $0^{gr},438$ de matière ont donné 0,244 d'eau et 0,927 d'acide carbonique.

II. $0^{gr},335$ d'un second échantillon ont donné 0,184 d'eau et 0,926 d'acide carbonique.

III. $0^{gr},381$ de matière ont donné 53 centimètres cubes d'azote à la température de 10 degrés et sous la pression de $0^{m},761$.

Résultats qui, traduits en centièmes, conduisent aux nombres suivants :

	I.	II.	III.		Théorie.	
Carbone..	57,72	57,78	»	C^6 .	48	57,83
Hydrogène.	6,18	6,09	»	H^5..	5	6,02
Azote.....	»	»	16,71	Az..	14	16,86
Oxygène..	»	»	»	O^2..	16	19,29
					83	100,00

La densité de vapeur du cyanate allylique nous a permis de contrôler la formule précédente. En effet l'expérience

Digitized by Google

directe nous a fourni les résultats suivants :

Température de l'air.....	12°
Température de la vapeur.....	152°
Excès de poids du ballon.....	$0^{gr},386$
Capacité du ballon.....	292^{cc}
Baromètre.....	$0^{m},762$
Air restant.....	0
D'où l'on déduit pour le poids du litre.	3,961
Et par suite pour la densité cherchée.	3,045

Le calcul fournit le nombre 2,9.

En effet on a :

8 vol. vap. de carbone.....	6,752
10 vol. vap. d'hydrogène.....	0,692
2 vol. vap. d'azote.....	1,944
2 vol. vap. d'oxygène.....	2,212

$$\frac{}{4} = 2,9$$

Urée allylique.

Lorsqu'on mêle le cyanate d'allyle avec une dissolution concentrée d'ammoniaque, la température s'élève, et si l'on a soin d'agiter le liquide avec une baguette, le cyanate d'allyle ne tarde pas à disparaître. En soumettant à l'évaporation le liquide homogène résultant de ce contact, on obtient une substance incolore magnifiquement cristallisée, soluble dans l'eau et dans l'alcool, et ne différant de la thiosinnamine qu'en ce que la totalité de son soufre s'y trouve remplacée par une équivalente proportion d'oxygène.

Ce composé, qui présente les propriétés d'une véritable urée et qui prend naissance dans les conditions où se forment d'ordinaire ces produits, donne à l'analyse les résultats suivants :

I. $0^{gr},320$ de matière ont donné 0,234 d'eau et 0,561 d'acide carbonique.

II. $0^{gr},275$ du même produit ont donné 66 centimètres cubes

Digitized by Google

d'azote à la température de 17 degrés et sous la pression de $0^{m},759$.

Ces résultats, traduits en centièmes, conduisent aux nombres suivants :

	I.	II.		Théorie.
Carbone.....	47,81	»	C^{8}...	48
Hydrogène. .	8,11	»	H^{8}...	8
Azote.....	»	27,86	Az^{2}..	28
Oxygène.....	»	»	O^{2}...	16
				100

Éthylallylurée.

En remplaçant la dissolution aqueuse d'ammoniaque par de l'éthyliaque, une vive réaction se produit, et par le refroidissement le liquide se concrète en une masse cristalline qui se dissout dans l'alcool et se sépare de ce liquide, par l'évaporation, sous la forme de beaux prismes semblables aux précédents.

Ce composé, qui constitue l'éthylallylurée, donne à l'analyse les résultats suivants :

$0^{gr},500$ de matière ont donné 0,417 d'eau et 1,029 d'acide carbonique.

D'où l'on déduit les nombres :

				Théorie.
Carbone....	56,12	C^{12}...	72	56,25
Hydrogène..	9,25	H^{12}...	12	9,37
Azote.....	»	Az^{2}...	28	21,95
Oxygène....	»	O^{2}....	16	12,43
			128	100,00

La méthyliaque, l'amyliaque et l'aniline nous ont fourni des résultats analogues. Nous n'avons point soumis ces derniers à l'analyse, mais leur ressemblance avec les précédents ne saurait laisser aucun doute sur leur composition.

Digitized by Google

Ces composés sont, comme on le voit, exactement semblables aux urées de M. Wurtz.

Diallylurée (sinapoline).

Lorsqu'on chauffe avec de l'eau pure le cyanate allylique, il prend une consistance butyreuse et finit par se solidifier entièrement. Le produit obtenu dans cette circonstance possède toutes les propriétés de la sinapoline, substance qui se forme, comme on sait, par l'action réciproque de l'hydrate de protoxyde de plomb et de l'essence de moutarde, et qui n'est autre chose que la diallylurée. Les propriétés de la substance précédente présentent une identité tellement parfaite avec celles de la sinapoline, et son mode de génération est tellement semblable à celui de la diméthylurée et de la diéthylurée de M. Wurtz, que nous n'avons pas jugé nécessaire d'en faire l'analyse.

Ce produit prend encore naissance lorsqu'on fait bouillir le cyanate allylique avec une dissolution aqueuse de potasse caustique dans le but de le transformer, à la manière de l'éther cyanique ordinaire, en carbonate alcalin et bases ammoniées. Sa formation se manifeste au début de la réaction.

Il est donc nécessaire pour pouvoir l'isoler d'arrêter cette dernière à un moment donné, car en continuant l'ébullition la sinapoline se détruirait à son tour en donnant naissance à du carbonate de potasse ainsi qu'aux bases précédentes.

La formation de la sinapoline au moyen de l'action réciproque du cyanate allylique et de l'eau s'explique facilement à l'aide de l'équation

$$\underbrace{2\,(C^8\,H^5\,Az\,O^2)}_{\text{Cyanate allylique.}} + 2\,HO = \underbrace{C^{16}\,H^{12}\,Az^2\,O^2}_{\text{Sinapoline diallylurée.}} + 2\,CO^2.$$

Digitized by Google

Allylamines.

Lorsqu'on fait bouillir le cyanate allylique avec une lessive concentrée de potasse caustique jusqu'à disparition complète de la couche huileuse, la décomposition est terminée et la cornue ne renferme qu'un mélange du carbonate de potasse formé dans la réaction et de l'excès d'hydrate alcalin employé. Si l'on dirige les produits distillés dans un récipient contenant de l'acide chlorhydrique, on obtient une matière saline qu'on peut faire cristalliser par l'évaporation. Ce produit consiste en un mélange dont les parties constituantes varient en nature et en proportion. Par l'action de la potasse sur cette matière, on sépare toujours une base qui est facilement soluble dans l'eau, et des huiles basiques insolubles et dont le point d'ébullition s'élève jusqu'à 180 degrés. La distillation même des bases séparées paraît déterminer une décomposition ultérieure.

Nous n'avons pas réussi à fixer bien nettement la nature de ce mélange, mais nous avons trouvé, comme on devait s'y attendre, qu'il contient toujours une quantité notable d'une base qui est à l'alcool allylique ce qu'est l'éthylamine à l'alcool ordinaire. La formation de cette substance, que nous appellerons *allylamine*, est parfaitement analogue à la production de l'éthylamine à l'aide du cyanate éthylique :

$$\underbrace{C^6H^5NO^2}_{\text{Cyanate éthylique.}} + 2(KO, HO) = 2(KO, CO^2) + \underbrace{C^4H^7N}_{\text{Éthylamine.}};$$

$$\underbrace{C^8H^5NO^2}_{\text{Cyanate allylique.}} + 2(KO, HO) = 2(KO, CO^2) + \underbrace{C^6H^7N}_{\text{Allylamine}}.$$

Mais, comme nous avons déjà dit, la décomposition du cyanate allylique est loin de présenter la même netteté que celle du composé analogue dans la série éthylique.

Comme il était impossible de séparer le mélange de bases par une distillation fractionnée, nous avons fixé la présence de l'allylamine par l'analyse du sel platinique.

Digitized by Google

En ajoutant du bichlorure de platine à la solution hydrochlorique des bases provenant de l'action de la potasse sur le cyanate allylique, on obtient dans la plupart des cas un précipité jaune pâle, tandis que le liquide filtré dépose par l'évaporation une cristallisation magnifique d'un sel en aiguilles d'une couleur orange foncé. Le précipité pâle (1) varie en quantité et en composition, tandis que le produit cristallisé présente une composition parfaitement constante et définie. Ce sel est soluble dans l'eau et se laisse facilement recristalliser. L'analyse des échantillons obtenus dans différentes préparations nous a donné les résultats suivants :

I. $0^{gr},467$ de sel platinique ont donné 0,216 CO^2 et 0,129 HO.

II. $0^{gr},219$ du même sel ont donné 0,082 de platine.

III. $0^{gr},272$ du même sel ont donné 0,102 de platine.

IV. $0^{gr},308$ du même sel ont donné 0,1155 de platine.

V. $0^{gr},02725$ du même sel ont donné 0,1025 de platine.

VI. $0^{gr},099$ du même sel ont donné 0,03725 de platine.

Ces résultats, traduits en centièmes, conduisent aux

---

(1) Ce précipité paraît être un mélange variable de sel platinique, d'ammoniaque et de méthyliaque. Voici quelques déterminations de platine dans ce précipité :

I. $0^{gr},3405$ de sel platinique ont donné 0,1485 de platine.

II. $0^{gr},26375$ du même sel ont donné 0,115 de platine.

III. $0^{gr},2945$ du même sel ont donné 0,1250 de platine.

IV. $0^{gr},321$ du même sel ont donné 0,1357 de platine.

V. $0^{gr},3345$ du même sel ont donné 0,1412 de platine.

VI. $0^{gr},2205$ du même sel ont donné 0,0927 de platine.

VII. $0^{gr},297$ du même sel ont donné 0,124 de platine.

Ce qui donne, en centièmes :

I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.
43,61	43,60	42,44	42,27	42,21	42,06	41,75

Le sel platinique de l'ammoniaque contient 44,22 pour 100 de platine, le sel de méthyliaque 41,68 pour 100 de platine.

Digitized by Google

nombres suivants :

	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
Carbone.....	12,61	»	»	»	»	»
Hydrogène...	3,07	»	»	»	»	»
Platine.....	»	37,44	37,5	37,5	37,61	37,62

La formule du sel platinique d'allylamine

$$C^6 H^7 N, HCl, PtCl^2 = \left\{ \begin{matrix} C^6 H^5 \\ H \\ H \end{matrix} \right\} HCl, PtCl^2$$

exige les nombres suivants :

C^6.....	36,0	13,68
H^8.....	8,0	3,05
N.....	14,0	5,31
Cl^3.....	106,5	40,46
Pt.....	98,7	37,50
	263,2	100,00

Le même corps se produit aussi par l'action de l'ammoniaque sur l'iodure allylique. En distillant le produit de cette réaction avec la potasse, il se dégage de l'ammoniaque, mais vers la fin de l'opération on obtient un liquide alcalin qui ne contient plus d'ammoniaque et sur lequel nage une petite quantité d'une huile basique. En saturant la solution aqueuse ainsi que l'huile par l'acide chlorhydrique et en ajoutant du bichlorure de platine, il se forme alors, soit immédiatement, soit par la concentration de la liqueur ou par une évaporation ménagée, des aiguilles magnifiques d'un jaune d'or, qui ne sont que le chloroplatinate d'allylamine :

$0^{gr},183$ de sel ont donné par la calcination 0,0685, soit 37,43 pour 100 de platine.

Diallylamine.

La digestion de l'allylamine impure obtenue soit par l'action de la potasse sur le cyanate allylique, soit au moyen de l'ammoniaque et de l'iodure allylique, avec une nouvelle quantité d'iodure allylique, ne tarde pas à fournir un nouveau mélange d'iodhydrates.

Digitized by Google

Ce mélange renferme probablement en quantité notable l'iodhydrate de diallylamine. Mais il aurait fallu des quantités très-grandes de matière pour séparer les produits qui composent ce mélange très-complexe. Nous nous sommes donc contentés de fixer par quelques expériences l'existence de la triallylamine et de l'oxyde de tétrallylammonium.

Triallylamine.

L'oxyde de tétrallylammonium dont nous parlerons tout à l'heure, soumis à l'action de la chaleur, se décompose avec dégagement d'une huile basique.

L'expérience n'a pas été faite sur une assez grande échelle pour étudier les produits complémentaires. L'analogie parfaite du composé tétrallylique avec le corps correspondant de la série éthylique ne laisse pas de doute sur la nature du produit basique provenant de sa décomposition au moyen de la chaleur. Cette huile basique devait être la triallylamine, l'expérience a confirmé cette conclusion. La base saturée par l'acide chlorhydrique et mélangée avec le bichlorure de platine dépose un sel platinique jaune pâle dont l'analyse fournit ce résultat :

0^{gr},1815 de sel de platine a donné 0,0515 de platine, soit 28,37 pour 100.

La formule du sel de platine triallylique

$$C^{18}H^{15}N, HCl, PtCl^2 = \left\{\begin{matrix} C^6H^5 \\ C^6H^5 \\ C^6H^5 \end{matrix}\right\} N, HCl, PtCl^2$$

exige les valeurs suivantes :

		Calcul.	Expérience.
C^{18}.....	108,0	31,47	»
H^{16}.....	16,0	4,66	»
N	14,0	4,08	»
Pt.....	98,7	28,76	28,37
Cl^3.....	106,5	31,03	»
	343,2	100,00	

Digitized by Google

Oxyde de tétrallylammonium.

Le produit principal de la réaction de l'ammoniaque sur l'iodure allylique est une combinaison magnifiquement cristallisée qui se dépose de la solution provenant de cette réaction. Nous avons traité l'iodure allylique par l'ammoniaque en vase clos, mais cela n'est pas nécessaire. L'iodure allylique est en effet promptement attaqué par une solution aqueuse à la température ordinaire. Par un contact de quelques jours, il se dissout une grande quantité d'iodure et la solution se prend quelquefois en masse. Si le liquide ne dépose rien, on n'a qu'à ajouter une solution concentrée de potasse pour séparer une couche huileuse qui ne tarde pas à se solidifier. Ces cristaux sont l'iodure de tétrallylammonium qui, comme les corps correspondants des séries éthyliques et méthyliques, est peu soluble dans une lessive de potasse. On obtient ce corps pur en l'exposant au contact de l'atmosphère jusqu'à ce que la potasse soit convertie en carbonate et en le faisant cristalliser de nouveau dans l'alcool absolu.

Soumis à l'analyse, ce composé nous a donné les résultats suivants :

0gr,3805 d'iodure ont donné 0,2905 d'iodure d'argent, soit 41,26 pour 100.

La formule

$$C^{24}H^{20}NI = \left.\begin{matrix} C^6H^5 \\ C^6H^5 \\ C^6H^5 \\ C^6H^5 \end{matrix}\right\} NI$$

exige la composition suivante :

			Expérience.
C^{24}....	144	47,20	»
H^{20}...	20	6,55	»
N....	14	4,59	»
I.....	127,1	41,66	41,26
	305,	1100,00	

Digitized by Google

L'iodure, traité par l'oxyde d'argent, se transforme promptement en oxyde. C'est une solution fortement alcaline qui possède toutes les propriétés de la base tétréthylique.

Ce produit, traité par l'acide chlorhydrique et le bichlorure de platine, donne un précipité jaune pâle, dont voici l'analyse :

I. $0^{gr},21$ de sel platinique ont donné $0,288\ CO^2$ et $0,0987\ HO$.
II. $0^{gr},311$ de sel de platine ont donné $0,0805$ de platine.

Ces nombres conduisent à la formule

$$C^{24}H^{20}NCl,PtCl^2 = \left\{\begin{matrix} C^6H^5 \\ C^6H^5 \\ C^6H^5 \\ C^6H^5 \end{matrix}\right\} NCl,PtCl^2.$$

	Calcul.		Expérience.	
			I.	II.
C^{24}...	144	37,57	37,40	»
H^{20}...	20	5,24	5,19	»
N....	14	3,65	»	»
Pt...	98,7	25,75	»	25,88
Cl^3...	106,5	27,79	»	»
	383,2	100,00		

L'examen des amides allyliques laisse beaucoup à désirer. Nous n'avons pu réussir à séparer les corps l'un de l'autre d'une manière assez satisfaisante pour pouvoir faire connaître les propriétés caractéristiques des différents termes de cette série. Néanmoins nos expériences démontrent l'existence incontestable dans la série allylique de quatre corps analogues aux quatre bases de la série éthylique.

Iodure de tétrarsénallylium.

L'iodure allylique attaque l'arséniure de potassium, mais beaucoup moins énergiquement que l'iodure éthylique; il se forme divers produits fétides d'un point d'ébullition très-variable, qu'il ne serait possible de séparer qu'à la condition d'opérer sur une très-grande échelle. Il se forme en

Digitized by Google

outre une matière cristalline qui probablement n'est autre chose que le composé

$$(C^6 H^5)^4 As I.$$

Les différents termes de cette nouvelle série peuvent se formuler de la manière suivante, en les comparant à leurs correspondants de la série vinique :

Série allylique.

Alcool allylique	$C^6 H^6 O^2$;
Éther allylique	$C^6 H^6 O$, ou $C^{12} H^{10} O^2$;
Chlorure allylique	$C^6 H^5 Cl$;
Bromure allylique	$C^6 H^5 Br$;
Iodure allylique	$C^6 H^5 I$;
Sulfure allylique (essence d'ail)	$C^6 H^5 S$;
Xanthate allylique	$C^6 H^5 O, C^2 S^4$;
Sulfocyanure (essence de moutarde)	$C^6 H^5 O, C^2 Az S$;
Cyanate allylique	$C^6 H^5 O, C^2 Az O$;
Oxalate allylique	$C^6 H^5 O, C^2 O^3$;
Oxamate allylique	$C^3 H^5 O, C^4 H^2 Az O^5$;
Carbonate allylique	$C^6 H^5 O, CO^2$;
Acétate allylique	$C^6 H^5 O, C^4 H^3 O^3$;
Benzoate allylique	$C^6 H^5 O, C^{14} H^5 O^3$;
Acide sulfo-allylique	$C^6 H^5 O, SO^3, HO, SO^3$;
Aldéhyde allylique (acroléine)	$C^6 H^4 O^2$;
Acide allylique	$C^6 H^4 O^4$;
Hydrocarbure (propylène)	$C^6 H^6$;
Urée allylique	$C^8 H^8 Az^2 O^2$;
Diacrylurée (sinapoline)	$C^{14} H^{12} Az^2 O^2$;
Urée allylique sulfurée (thiosinnamine)	$C^8 H^8 Az^2 S^2$;

Série vinique.

Alcool vinique	$C^4 H^6 O^2$;
Éther ordinaire	$C^4 H^5 O$ ou $C^8 H^{10} O^2$;
Chlorure éthylique	$C^4 H^5 Cl$;
Bromure éthylique	$C^4 H^5 Br$;
Iodure éthylique	$C^4 H^5 I$;
Sulfure éthylique	$C^4 H^5 S$;
Xanthate éthylique	$C^4 H^5 O, C^2 S^4$;

Digitized by Google

Sulfocyanure éthylique	$C^4 H^5 S, C^2 AzS$;
Cyanate éthylique	$C^4 H^5 O, C^2 Az O$;
Oxalate éthylique	$C^4 H^5 O, C^2 O^3$;
Oxamate éthylique	$C^4 H^5 O, C^4 H^2 Az O^5$;
Carbonate éthylique	$C^4 H^5 O, CO^2$;
Acétate éthylique	$C^4 H^5 O, C^4 H^3 O^3$,
Benzoate éthylique	$C^4 H^5 O, C^{14} H^5 O^3$;
Acide sulfovinique	$C^4 H^5 O, SO^3, HO SO^3$;
Aldéhyde vinique	$C^4 H^4 O^2$;
Acide acétique	$C^4 H^4 O^4$;
Hydrocarbure (acétène)	$C^4 H^6$;
Urée éthylique	$C^6 H^8 Az^2 O^2$;
Diéthylurée	$C^{10} H^{10} Az^2 O^2$;
Urée éthylique sulfurée	$C^6 H^8 Az^2 S^2$.

Si l'on jette un coup d'œil sur les résultats qui précèdent, il est facile de reconnaître que le propylène homologue du gaz oléfiant est susceptible de fournir un alcool monatomique et des dérivés qui présentent avec lui les mêmes relations de composition que celles qu'on observe entre le gaz des marais et les composés méthyliques, entre le toluène l'analogue du gaz des marais et les composés benzoïques.

Les carbures d'hydrogène homologues du gaz des marais, les homologues du gaz oléfiant et probablement beaucoup d'autres carbures d'hydrogène peuvent donc être considérés comme le point de départ des divers alcools et par suite de toutes les combinaisons qu'on peut en faire dériver. Tous ces alcools se forment par fixation de deux équivalents d'oxygène, phénomène que nous sommes incapables d'accomplir aujourd'hui directement, et qui n'est que le résultat d'une série de substitutions.

$$\underbrace{C^4 H^2}_{\text{Gaz des marais.}} + O^2 = \underbrace{C^2 H^4 O^2}_{\text{Alcool methylique.}},$$

$$\underbrace{C^{14} H^8}_{\text{Toluène.}} + O^2 = \underbrace{C^{14} H^8 O^2}_{\text{Alcool benzoïque.}},$$

$$\underbrace{C^6 H^6}_{\text{Propylène.}} + O^2 = \underbrace{C^6 H^6 O^2}_{\text{Alcool allylique.}},$$

Digitized by Google

Le gaz oléfiant et ses homologues peuvent engendrer également des alcools monatomiques par une autre réaction qu'on n'a pas encore appliquée à la série des corps homologues du gaz des marais. En effet, on sait par les belles expériences de M. Berthelot que le gaz oléfiant et ses homologues peuvent se transformer en alcool par fixation de 2 équivalents d'eau. Le gaz oléfiant fournit, par cette réaction, l'alcool ordinaire, le propylène, l'alcool propylique :

$$\underbrace{C^4 H^4}_{\text{Gaz oléfiant.}} + 2\,HO = \underbrace{C^4 H^6 O^2}_{\text{Alcool ordinaire.}},$$

$$\underbrace{C^6 H^6}_{\text{Propylène.}} + 2\,HO = \underbrace{C^6 H^8 O^2}_{\text{Alcool propylique.}}.$$

Au gaz oléfiant, ainsi qu'à chacun de ses homologues, correspondent donc deux alcools monatomiques, doués chacun d'allures un peu différentes, mais présentant dans chaque série les analogies les plus manifestes. Les alcools, obtenus par fixation d'eau, tels que l'alcool ordinaire, sont parfaitement connus depuis longtemps, et l'étude approfondie qu'on a faite depuis une vingtaine d'années de ces curieux composés, a certes exercé l'influence la plus heureuse sur le développement de cette partie de la science à laquelle on donne fort improprement le nom de *chimie organique*. Il n'en était pas de même des alcools fournis par ces mêmes carbures d'hydrogène au moyen de la fixation de deux molécules d'oxygène ; la découverte que nous venons de faire de l'alcool allylique, tout en jetant une vive lumière sur les propriétés curieuses des composés de ce nouveau groupe, établit en outre un lien fort étroit entre cette substance et certains produits naturels fort intéressants qu'on n'avait pu classer jusqu'à présent, tels que les essences sulfurées fournies par les bulbes de l'ail (*Allium sativum*) et les graines de la moutarde noire (*Sinapis nigra*).

Il est probable qu'en soumettant à des réactions analogues les différents polymères du propylène, on pourra réaliser

Digitized by Google

la formation d'alcools homologues de l'alcool allylique. Ce qu'il y a de certain, c'est qu'en distillant un mélange de cyanate d'argent et d'amylène bromé, on obtient un liquide volatil, doué d'une odeur fort irritante qui provoque le larmoiement à la manière des éthers cyaniques, formant, par son contact avec l'ammoniaque, une urée cristallisée et se dédoublant sous l'influence de la potasse caustique en donnant différentes bases, au nombre desquelles figure le composé

$$C^{10} H^{11} Az,$$

l'homologue de l'allylamine. L'alcool correspondant à l'amilène serait donc $C^{10} H^{10} O^2$, qui ne serait autre que l'alcool angélique

L'alcool allylique dont nous venons d'esquisser les propriétés les plus saillantes, formerait donc le troisième terme d'une série que l'on peut représenter par la formule générale

$$C^{2n} H^{1n} O^2$$

dont l'acide (acide acrylique) est connu depuis plusieurs années.

On connaît en effet un groupe d'acides homologues qui sont dans les mêmes relations de composition à l'égard de l'acide acétique, que notre alcool à l'égard de l'alcool ordinaire. Le cyanure acrylique qui se forme par l'action réciproque de l'iodure acrylique et du cyanure d'argent, mais que n'avons pu obtenir dans un état de pureté suffisante pour le soumettre à l'analyse, pourrait se transformer sous l'influence de la chaleur et d'une lessive de potasse en un acide homologue de l'acide acrylique, de même que l'éther propylcyanhydrique se résout dans de semblables conditions en acide butyrique. Cet acide serait représenté par la formule

$$C^8 H^6 O^4.$$

Nous terminerons ce travail par un tableau qui fait res-

Digitized by Google

sortir les analogies que présentent les deux séries alcooliques, ainsi que les acides qui leur correspondent.

Groupe alcool.		Groupe acide.	
$C^2\ H^4\ O^2$ Méthylique.	$C^2\ H^2\ O^2$	$C^2\ H^2\ O^4$ Formique.	$C^2\ O^4$
$C^4\ H^6\ O^2$ Éthylique.	$C^4\ H^4\ O^2$	$C^4\ H^4\ O^4$ Acétique	$C^4\ H^2\ O^4$
$C^6\ H^8\ O^2$ Propylique.	$C^6\ H^6\ O^2$ Allylique.	$C^6\ H^6\ O^4$ Propionique.	$C^6\ H^4\ O^4$ Acrylique.
$C^8\ H^{10}\ O^2$ Butyrique.	$C^8\ H^8\ O^2$	$C^8\ H^8\ O^4$ Butyrique.	$C^8\ H^6\ O^4$ Ac. allylique
$C^{10}\ H^{12}\ O^2$ Amylique.	$C^{10}\ H^{10}\ O^2$ Angélique.	$C^{10}\ H^{10}\ O^4$ Valérique.	$C^{10}\ H^8\ O^4$ Angélique.
$C^{12}\ H^{14}\ O^2$ Caproylique.	$C^{12}\ H^{12}\ O^2$	$C^{12}\ H^{12}\ O^4$ Caproïque.	$C^{12}\ H^{10}\ O^4$
$C^{14}\ H^{16}\ O^2$ OEnanthylique.	$C^{14}\ H^{14}\ O^2$	$C^{14}\ H^{14}\ O^4$ OEnanthylique.	$C^{14}\ H^{12}\ O^4$
$C^{16}\ H^{18}\ O^2$ Caprylique.	$C^{16}\ H^{16}\ O^2$	$C^{16}\ H^{16}\ O^4$ Caprylique.	$C^{16}\ H^{14}\ O^4$
. . . . .		. . . . .	
. . . . .		. . . . .	
. . . . .		. . . . .	
. . . . .		. . . . .	
$C^{36}\ H^{38}\ O^2$ Stéarique.	$C^{36}\ H^{36}\ O^2$	$C^{36}\ H^{36}\ O^4$ Stéarique.	$C^{36}\ H^{34}\ O^4$ Oléique.

Un coup d'œil jeté sur ce tableau montre combien les représentants de la série des alcools $C^{2n}\ H^{2n}\ O^2$ et des acides $C^{2n}\ H^{2n-2}\ O^4$ se présentent peu fréquemment. Les progrès de la science ne tarderont pas sans doute à remplir les nombreuses lacunes de ce tableau.

Nous connaissons même dans ce moment quelques corps qui se rattachent fort étroitement aux séries précédentes. En effet, l'alcool cinnamique et son acide appartiennent à un groupe de substances qui sont aux alcools et aux acides aromatiques ce que l'alcool allylique, son acide et leurs homologues sont aux alcools et aux acides des corps gras.

Digitized by Google

Groupe alcool.		Groupe acide.	
$C^{14} H^{8} O^{2}$	$C^{14} H^{6} O^{2}$	$C^{14} H^{6} O^{4}$	$C^{14} H^{4} O^{4}$
Benzoïque.		Benzoïque.	
$C^{16} H^{10} O^{2}$	$C^{16} H^{8} O^{2}$	$C^{16} H^{8} O^{4}$	$C^{16} H^{6} O^{4}$
Toluique.		Toluique.	
$C^{18} H^{12} O^{2}$	$C^{18} H^{10} O^{2}$	$C^{18} H^{10} O^{4}$	$C^{18} H^{8} O^{4}$
Xylique.	Cinnamiq. (Styrone.)	Xylique.	Cinnamique.
$C^{20} H^{14} O^{2}$	$C^{20} H^{12} O^{2}$	$C^{20} H^{12} O^{4}$	$C^{20} H^{10} O^{4}$
Cuminique.		Cuminique.	

Le tableau montre aussi combien il y a de corps à découvrir dans cette direction. L'acide cinnamique contient 2 équivalents d'hydrogène de moins que l'acide inconnu $C^{18} H^{10} O^{4}$ que l'on découvrira entre l'acide toluique et l'acide cuminique, et il est à cet acide ce que l'acide acrylique est à l'acide propionique.

Les acides appartenant au groupe allylique jouissent tous de la propriété remarquable de se transformer, par la fixation de deux molécules d'oxygène et de deux molécules d'eau, en acide acétique et en un second acide homologue; c'est ce qu'établit l'équation suivante :

$$C^{2n} H^{2n-2} O^{4} + 4\,HO = C^{4} H^{4} O^{4} + C^{2n-4} H^{2n-4} O^{4} + 2\,H.$$

C'est ainsi que les acides acrylique, angélique et oléique se dédoublent sous l'influence de l'hydrate de potasse à une température de 200 degrés en acides acétique et formique, propionique et éthalique.

L'acide cinnamique éprouve sous l'influence de la potasse fondante une altération parfaitement analogue; cet acide fixe en effet deux molécules d'oxygène et deux molécules d'eau, et se scinde en acides acétique et benzoïque.

C'est ce qu'exprime l'équation

$$C^{18} H^{8} O^{4} + 4\,HO = C^{4} H^{4} O^{4} + C^{14} H^{6} O^{4} + 2\,H.$$

Qu'il nous soit permis, en terminant, d'adresser nos remercîments à M. A. Church, qui a bien voulu nous assister dans l'accomplissement de ces recherches.

Digitized by Google

ÉTUDES SUR LES MACHINES MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES;

PAR M. F.-P. LE ROUX,
Répétiteur à l'École impériale Polytechnique.

Mémoire présenté à l'Académie des Sciences le 27 octobre 1857.

Depuis la découverte de l'induction, le nombre des faits qui forment cette branche de l'électrodynamique s'augmente chaque jour, et tout récemment on a pu voir de très-remarquables effets produits par des appareils d'induction. Mais jusqu'ici on s'est surtout préoccupé des appareils dans lesquels la force initiale, le moteur, est un courant électrique. Les appareils *magnéto-électriques*, où l'on transforme la force motrice en force électrique, sont restés presque délaissés, sauf quelques applications restreintes.

Le problème inverse, c'est-à-dire la transformation de la force électrique en force motrice, séduit plus facilement les esprits. Si bien des essais infructueux ont été faits dans cette direction, cela tient surtout à ce que les principes philosophiques de l'équivalence des forces de la nature n'ont pas pénétré assez avant dans la science vulgaire, malgré les travaux de tant de physiciens illustres. Cette équivalence se vérifie dans les machines magnéto-électriques d'une manière frappante, ainsi que le fera voir la suite de ce Mémoire, de telle sorte que, jusqu'au jour où l'on aura trouvé un moyen chimique de produire l'électricité à un prix moins élevé qu'aujourd'hui, ces mêmes principes pourront être invoqués pour démontrer l'avantage qu'il peut y avoir à opérer la transformation de la force motrice en électricité.

Comme cela arrive très-souvent, c'est une sorte d'utopie qui nous a ouvert la route. Feu M. Nollet, professeur de physique à l'école militaire de Bruxelles, avait eu, comme bien d'autres, l'idée de décomposer par l'électricité l'eau ou diverses dissolutions pour employer à l'éclairage les gaz pro-

Digitized by Google

venant de cette décomposition. L'inventeur mourut avant d'avoir pu réaliser son idée sur une vaste échelle ; mais les plans qu'il avait laissés servirent à faire exécuter six machines qui, par suite de diverses combinaisons, devinrent la propriété d'une compagnie qui avait entrepris l'éclairage au gaz des Invalides.

Le premier essai fit voir combien était désavantageuse une telle opération, qui exigeait pour la production à l'heure 1 mètre cube environ de gaz, l'emploi de six machines de quatre-vingts bobines chacune ; et une force motrice de six chevaux-vapeur. Néanmoins, il y avait là un appareil capable de développer une force électrique considérable. Mais il restait à perfectionner le dégagement de cette force, et à en régulariser l'emploi. La première idée fut pour son utilisation à la production de la lumière. Des expériences intéressantes eurent lieu qui prouvaient que l'emploi de la lumière électrique, bien loin de pouvoir se prêter aux usages de la vie ordinaires, était cependant assez près de pouvoir être utilisée dans certains cas spéciaux, dont le plus prochain paraît être l'emploi à bord des vaisseaux, soit pour les signaux de nuit, soit comme fanal afin d'éviter les abordages, et aussi pour les phares, dès que l'on aura trouvé une lampe d'un usage suffisamment constant.

Une autre application est encore plus nettement indiquée.

Pour quiconque a visité les ateliers où s'opère le dépôt des métaux, il est évident que l'électricité, en faisant disparaître l'industrie meurtrière de la dorure au mercure, a donné naissance à plusieurs autres industries qui, moins franchement homicides, exercent peut-être des ravages tout aussi étendus. Sans compter en effet la dorure et l'argenture, qui prennent chaque jour une nouvelle extension, le cuivrage et le laitonnage du fer tendent à entrer dans les habitudes de plusieurs fabrications, et nécessitent chaque jour l'emploi d'un grand nombre d'éléments de Bunsen,

Digitized by Google

dont les émanations exercent sur les ouvriers une fâcheuse influence.

Au point de vue économique, comme au point de vue hygiénique, l'emploi d'une source mécanique d'électricité offrirait de nombreux avantages. Aussi les industriels appellent-ils de tous leurs vœux la solution de ce problème. M. Elkington, en Angleterre, a déjà fait plusieurs essais dans ce sens, mais jusqu'ici l'étude imparfaite des conditions si multiples qui influent sur le dégagement des courants d'induction, n'a pas permis une bonne utilisation de ces appareils.

C'est dans l'espoir d'aider à la solution de cette question que j'ai entrepris une série d'expériences, dont je soumets les premières au jugement de l'Académie.

Description des appareils.

Avec les éléments des machines des Invalides, mis obligeamment à ma disposition par la compagnie, j'installai un appareil dont quelques mots feront comprendre facilement la disposition.

Sur un arbre en fer sont disposées deux roues en bronze, portant sur leur circonférence chacune seize bobines. Chacune de ces roues peut tourner entre deux rangées circulaires d'aimants, supportés par des traverses de bois. Il y a huit aimants en fer à cheval, de telle sorte que toutes les bobines à la fois peuvent se trouver chacune devant un pôle d'aimant.

Chaque aimant est un faisceau composé de six lames en fer à cheval superposées. Chacune de ces lames a une épaisseur de 1 centimètre, sur une largeur de 5 centimètres. La distance du sommet du fer à cheval à l'extrémité des branches est égale à $0^{m},48$.

Les bobines se composent d'un cylindre creux formé par un morceau de tôle dont les deux bords ne se rejoignent point, afin d'intercepter les courants d'induction produits

Digitized by Google

à la surface du fer lui-même, et dont l'effet est de ralentir la désaimantation. Le diamètre de ce cylindre est de 4 centimètres, sa longueur de 95 millimètres, et l'épaisseur de la tôle qui le forme de $1^{mm},5$ environ.

Sur chaque bobine sont enroulés quatre fils de cuivre égaux et isolés dans leur longueur, mais réunis à leurs extrémités. Le diamètre est $1^{mm},1$. La résistance de l'ensemble a été trouvée en moyenne équivalente à celle de 11 mètres de fil de cuivre pur de 1 millimètre de diamètre.

Telle est la disposition des appareils, que j'ai pu, grâce à la bienveillance de M. le général Morin, faire transporter au Conservatoire des Arts et Métiers, où sont réunis tous les éléments mécaniques nécessaires à l'expérimentation des machines.

Je diviserai en deux parties le résumé des expériences que j'y ai faites : la première est relative à l'étude des circonstances qui font varier l'intensité du courant, la seconde à l'évaluation du travail mécanique employé.

PREMIÈRE PARTIE.

Influence du commutateur. — Il était une influence purement mécanique qui devait être évaluée tout d'abord, c'est celle du commutateur. Je ne m'arrêterai pas à décrire les divers inconvénients que présente toujours cette partie indispensable des appareils. Le plus grand, sans contredit, est la production des étincelles qui détériorent promptement, en les fondant et en les oxydant, les surfaces en contact, surtout aux points de rupture. Dans ces appareils, animés d'un mouvement rapide, la rupture du circuit peut être produite par deux causes différentes : d'une part, les solutions de continuité régulières qui sont essentielles à l'appareil ; d'autre part, les ressauts qu'éprouvent les ressorts frotteurs. La moindre inégalité de la surface du commutateur occasionne ces ressauts, et leur périodicité détermine dans les ressorts un état vibratoire qui augmente

Digitized by Google

le nombre des interruptions ; de là affaiblissement du courant.

Un manchon en bois, concentrique à l'arbre de la machine, portant deux anneaux métalliques, isolés, et munis de segments s'emboîtant les uns dans les autres, mais de manière à ne pas se toucher, voilà le commutateur de notre appareil. Au milieu est pratiquée une légère gorge qui reçoit une sorte de petit marteau en cuivre rouge, attaché à un conducteur faisant ressort. Pour éviter autant que possible la vibration de ce frotteur, je le bandais légèrement au moyen d'un ressort en caoutchouc, dont la tension assurait un contact aussi continu que possible. Cette disposition peut donner de bons résultats, pourvu que les courants ne soient pas trop intenses, auquel cas la détérioration des surfaces est très-rapide.

Pour avoir une idée de l'influence du commutateur aux diverses vitesses que pouvait prendre la machine, je supprimai la communication avec les bobines, et mis dans le circuit extérieur un élément de Bunsen et une boussole de sinus. La vitesse variant de 0 à 300 tours par minute, les déviations furent comprises entre 32° 30′ et 31° 45′, dont les sinus sont 0,537... et 0,526... Ainsi la somme de toutes les erreurs et de l'influence du commutateur s'est trouvée moindre que $\frac{1}{50}$ de la valeur de l'intensité du courant perçu.

Variations de l'intensité avec la résistance. — Mon premier soin fut de rechercher si la loi générale $I = \frac{e}{\Sigma R}$ était applicable dans tous les cas aux courants produits par l'appareil en question.

Pour opérer cette vérification, je maintenais la vitesse du mouvement aussi constante que possible, ce à quoi se prêtait très-bien l'excellente machine à vapeur installée au Conservatoire, dans la salle des machines en mouvement. Un rhéostat et une boussole de sinus étaient placés dans le circuit.

Digitized by Google

La résistance a varié, suivant les cas, de trois à quarante tours d'un rhéostat, c'est-à-dire entre 60 et 800 mètres environ d'un fil de cuivre de 1 millimètre de diamètre.

Les résultats de cette série d'expériences s'accordent assez bien avec la formule indiquée, tant que la résistance extérieure est de beaucoup, c'est-à-dire de quarante à cinquante fois, supérieure à la résistance intérieure. Mais si les résistances extérieures deviennent comparables à la résistance intérieure, l'intensité du courant croît beaucoup moins rapidement que la formule précédente ne l'indique.

Il résulte de là que le courant a sur lui-même une influence négative d'autant plus marquée qu'il est plus énergique. Nous allons du reste vérifier le même fait par une autre méthode.

Variations de la force électromotrice avec la vitesse et avec la tension intérieure. — Les variations que nous venons de considérer au point de vue de l'intensité, peuvent être attribuées à la *force électromotrice* du système. Comment donc varie cette force électromotrice avec la vitesse du mouvement et avec les circonstances de tension intérieure? Tel est l'objet de cette seconde série d'expériences.

L'appareil était disposé de telle sorte, qu'il fût facile d'arranger les bobines, soit en tension, soit en surface, de la même manière que les éléments d'une pile.

Deux méthodes ont été employées pour faire la comparaison dont il s'agit : l'une qui consistait à opposer au courant de la machine un nombre variable d'éléments de Bunsen, l'autre à évaluer l'intensité au moyen d'une boussole de sinus.

Comparaison par opposition. — Pour faire cette comparaison, j'introduisais dans le circuit une pile d'un nombre variable d'éléments, et un galvanomètre très-sensible.

Un compteur, adapté à l'axe de la machine, indiquait le nombre de tours qui mesurait la vitesse de rotation nécessaire pour maintenir l'aiguille du galvanomètre au zéro.

Digitized by Google

Les éléments employés comme terme de comparaison étaient de petits éléments de Bunsen à charbon annulaire extérieur plongeant dans l'acide nitrique, et à zinc plat, bien amalgamé, dans l'eau acidulée au $\frac{1}{10}$.

Le circuit étant le même pour les deux courants, la formule qui donne la force électromotrice x, est $nx = n'e$, n étant le nombre des bobines mises en tension, n' celui des éléments de Bunsen, et e la force électromotrice de ces éléments. Voici les tableaux des expériences :

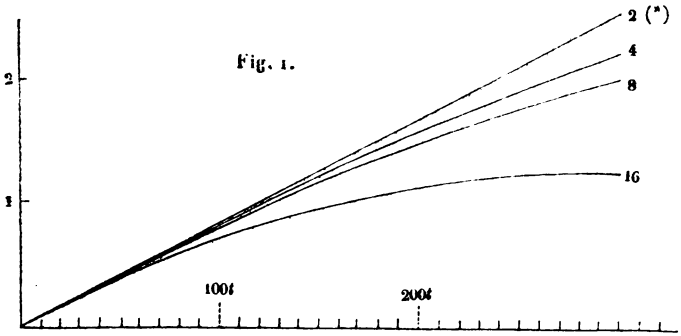
NOMBRE DES BOBINES mises en tension.	NOMBRE DE TOURS en 1 minute.	NOMBRE d'éléments opposés.	FORCES électromotrices.
2 bobines....	60	1	0,50
Id.....	120	2	1,00
Id.....	180	3	1,50
Id.....	240	4	2,00
Id.....	300	5	2,50
Id.....	180	3	1,50
4 bobines....	64	2	0,50
Id.....	164	5	1,25
Id.....	228	7	1,75
Id.....	272	8	2,00
Id.....	228	7	1,75
Id.....	192	6	1,50
Id.....	162	5	1,25
Id.....	130	4	1,00
Id.....	96	3	0,75
8 bobines....	136	8	1,00
Id.....	100	6	0,75
Id.....	66	4	0,50
Id.....	300	16	2,00
Id.....	244	14	1,75
Id.....	172	10	1,25
Id.....	136	8	1,00
Id.....	100	6	0,75
16 bobines....	68	8	0,50
Id.....	160	16	1,00
Id.....	280	20	1,25
Id.....	220	18	1,125
Id.....	168	16	1,00
Id.....	112	12	0,75
Id.....	92	10	0,625

Digitized by Google

On voit, d'après ce tableau, que la force électromotrice est loin de croître de la même manière, suivant que les bobines sont disposées en tension ou en surface, si l'on peut s'exprimer ainsi, pour continuer l'assimilation des bobines aux éléments d'une pile hydro-électrique.

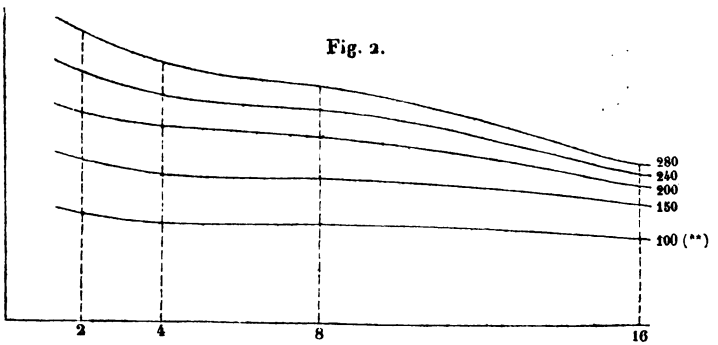
L'ensemble des expériences est résumé d'une façon plus saisissable dans les figures ci-dessous, qui donnent les courbes des intensités dans les divers cas.

Fig. 1.



On y remarque, *fig.* 1, que pour la disposition de deux bobines seulement en tension, la courbe paraît être une ligne droite. Lorsque la tension augmente, celle-ci s'incline fortement vers l'axe des vitesses, et l'on voit que pour seize bobines en tension, la force électromotrice croît très-peu rapidement à partir de 200 tours par minute, et se trouve près d'un maximum à 300.

Fig. 2.



(*) On a indiqué ici le nombre des bobines mises en tension.

(**) Ces chiffres indiquent le nombre de tours par minute.

Digitized by Google

On peut présenter les mêmes résultats sous une autre forme, *fig.* 2. Les ordonnées représentent toujours les forces électromotrices, mais on a porté comme abscisses les nombres des bobines mises en tension. On a ainsi obtenu, pour les mêmes valeurs de la vitesse, l'indication de la manière dont varie la force électromotrice suivant la combinaison des bobines.

Même étude au moyen de la boussole de sinus. — Dans une autre série d'expériences, j'ai entrepris la même comparaison au moyen de la boussole de sinus.

En dressant des courbes analogues aux précédentes, on y reconnaît la même marche générale des phénomènes. Mais on remarque cette différence, que l'on ne trouve jamais, en opérant ainsi, qu'une ligne droite puisse représenter la marche des intensités, même pour le cas d'une seule bobine en tension. On est donc amené à conclure que la force électromotrice est fonction de l'intensité même du courant qui circule.

Si nous cherchons les causes de ces variations, nous les trouvons très-complexes.

Il semble que l'intensité du courant devrait croître proportionnellement au nombre des changements de polarité effectués dans l'unité de temps. Mais, d'une part, le courant réagit sur lui-même, et cette réaction croît évidemment avec l'intensité du courant; d'autre part, lorsqu'il y a plusieurs bobines en tension, la superposition des courants vient augmenter encore ces effets négatifs. Ceux-ci sont de deux sortes: d'une part un ralentissement des changements de polarité, et d'autre part un affaiblissement du courant que l'on veut recueillir par l'existence d'un contre-courant d'induction.

Le retard dans l'aimantation est mis en évidence par ce fait qu'il y a dans certains cas avantage à faire en sorte que l'interruption du commutateur ne coïncide pas tout à fait avec le passage de l'extrémité des bobines devant les pôles d'aimant, et se trouve un peu en retard de celui-ci.

Digitized by Google

L'influence du courant sur lui-même nous est prouvé par les expériences dans lesquelles on a fait varier la résistance, et qui ont montré que l'intensité croissait moins rapidement que l'inverse de la résistance. Elle est non moins clairement indiquée par la différence que nous venons de signaler entre les comparaisons par opposition, et celles faites au moyen de la boussole de sinus; avec cette différence que dans celles-ci, l'intensité prenait des valeurs très-variables; dans les premières, au contraire, on pouvait la regarder comme sensiblement nulle. Je dis sensiblement nulle, car on n'est pas en droit d'assimiler complétement à l'opposition de deux courants hydro-électriques celle d'un courant hydro-électrique à un courant d'induction. Celui-ci, en effet, variable par sa nature, ne peut que laisser prendre une sorte de moyenne, les périodes d'infériorité et de supériorité se succédant pour chacun des courants opposés.

Quant à l'effet de la superposition, il rentre évidemment dans celui de l'intensité; car la superposition des courants provenant de plusieurs bobines disposées en tension, ne fait qu'augmenter l'intensité du courant qui les parcourt.

Résumé.

Il résulte de tout ce qui précède que, dans la construction ou l'usage des appareils magnéto-électriques, on doit avoir égard aux principes suivants :

1°. Pour une même vitesse, l'intensité ne croît pas en raison inverse de la résistance du circuit, à moins que celle-ci ne soit très-grande relativement à celle de l'appareil;

2°. Pour une même vitesse, l'effet produit par chaque élément est d'autant moindre qu'il y a un plus grand nombre d'éléments en tension;

3°. L'effet produit croît d'autant moins avec la vitesse qu'il y a un plus grand nombre d'éléments en tension.

Ces principes intéressent la construction des appareils qui nous occupent, ils montrent que chacun d'eux doit, autant que possible, être construit en vue de l'emploi au-

Digitized by Google

quel il est destiné. Ainsi pour les applications telles que le dépôt des métaux, etc., cas où la tension ne doit pas être très-grande, on pourra augmenter la force électromotrice en faisant croître la vitesse. Mais pour les effets lumineux qui nécessitent une tension considérable, l'intensité atteint sa limite pour une valeur relativement assez faible de la vitesse; on devra donc chercher à augmenter la force électromotrice, en rendant aussi forte que possible l'influence magnétique.

Je ne présente ces conséquences que comme une première approximation. J'espère qu'une nouvelle série d'expériences, faites avec un appareil disposé d'une manière tout à fait appropriée, pourra me fournir les éléments nécessaires pour formuler les lois rigoureuses de ces phénomènes.

SECONDE PARTIE.

Évaluation de l'équivalent mécanique des effets électriques.

Un appareil magnéto-électrique est l'un des plus frappants exemples de la transformation des forces de la nature les unes dans les autres; la force motrice employée pour déterminer le mouvement relatif des aimants et des bobines se retrouve dans le circuit en chaleur, en lumière, en force mécanique, en affinité vaincue, en cohésion détruite, etc.

Il est facile, tout d'abord, de prouver que dans le travail absorbé par le mouvement de la machine il en est une portion spécialement affectée à la production du courant. On peut même faire l'expérience sous une forme frappante parce qu'elle est grossière. Le circuit étant ouvert, une personne peut facilement mettre l'appareil en mouvement; mais si l'on vient inopinément à réunir les extrémités du fil conjonctif, la personne qui tourne s'arrête étonnée du surcroît de résistance. Ainsi, dès que le courant peut se

Digitized by Google

produire, il faut augmenter la dépense de force motrice ; mais on retrouve l'équivalent de cette augmentation en chaleur dégagée dans le fil des bobines et dans le conducteur interpolaire.

C'est cette équivalence que je me suis proposé de vérifier par des expériences variées, dans des circonstances où cette vérification n'a pas encore été faite.

Voici la méthode employée. La machine marchant d'un mouvement uniforme sans que le circuit fût fermé, on a déterminé le travail passif total de l'appareil pour la vitesse considérée ; ce travail passif consistant tant dans le frottement des organes que dans la force employée pour l'établissement de certains courants d'induction, produits soit dans les aimants, soit dans les masses de fer doux, ou dans les rondelles qui retiennent le fil. Cette détermination faite, on ferme le circuit dans lequel se trouve un fil de platine de résistance connue, contourné en spirale dans l'eau d'un calorimètre ; un thermomètre qui y plonge permet d'évaluer l'élévation de température produite par le passage du courant. Connaissant le rapport de la résistance du circuit total à celle de la spirale, il est facile de calculer la chaleur dégagée dans tout le circuit, ce qui se fait facilement au moyen de la loi démontrée par Ed. Becquerel, Joule, etc. Cette quantité de chaleur, comparée au travail mécanique dépensé, doit nous ramener à l'équivalent mécanique connu de la chaleur. Les résultats, comme on va le voir, s'accordent assez bien entre eux et avec les chiffres donnés par Joule, pour que l'on puisse y voir une confirmation de la loi citée, et l'extension aux circuits magnéto-électriques du principe vérifié par M. Favre pour les courants hydro-électriques.

Voici une expérience dont je citerai les chiffres pour donner une idée de l'influence des erreurs possibles.

La machine, mise en mouvement au moyen d'une roue à bras munie de la manivelle dynamométrique de M. le gé-

Digitized by Google

néral Morin, marchait *à vide* à la vitesse de 30 tours de manivelle par minute, moyennant un effort moyen de $5^k,72$ par tour de manivelle (1 tour de manivelle correspondait à 4 tours de la machine). En fermant le circuit par une spirale de platine, 444 tours de manivelle, à la vitesse indiquée, produisirent dans le calorimètre une élévation de température de $17^o,75$, en exigeant un surplus d'effort égal à $4^k,900$ par tour, ce qui correspond à un travail total de 5312 kilogrammètres. Il y avait $198^{gr},80$ d'eau dans le calorimètre. Celui-ci était disposé dans de bonnes conditions pour diminuer l'influence du refroidissement, dont il était d'ailleurs tenu compte; enfin toutes les précautions furent prises pour assurer l'exactitude des résultats. En tenant compte de toutes les corrections, la chaleur dégagée dans le calorimètre se trouva être de $3^{cal},342405$. J'avais d'ailleurs mesuré les résistances qui étaient, pour le circuit total, de 189,8, et pour la spirale de platine (à la température moyenne de l'expérience) de 55,2 divisions du rhéostat qui a servi à M. Ed. Becquerel pour ses expériences sur la conductibilité. La quantité totale de chaleur a donc été $3^{cal},342405 \times \frac{189,3}{55,2} = 11^{cal},492$.

Le quotient du travail par ce nombre donne $462^k,23$.

Dans d'autres expériences, je mesurai le travail par une autre méthode.

A l'extrémité de l'arbre de l'appareil fut adapté un tambour en bois; sur ce tambour s'enroulait une corde passant dans la gorge d'une poulie fixée au sommet de la voûte de l'édifice. Je disposais ainsi d'une hauteur de 25 mètres, doublée par l'addition d'une poulie mouflée. La chute d'un poids variable à volonté donnait la force motrice.

On commençait par déterminer la valeur du poids moteur nécessaire pour faire marcher l'appareil à vide sous une certaine vitesse, 60 tours à la minute par exemple. L'uniformité du mouvement qui pouvait durer au moins une minute, était vérifiée soigneusement au moyen d'un

Digitized by Google

chronomètre à pointage. La détermination du poids moteur pouvait être faite $0^k,05$ près. Puis on fermait le circuit au moyen du voltamètre calorifique, comme ci-dessus. On cherchait le poids moteur nécessaire pour maintenir la même vitesse que précédemment ; on pouvait donc par différence arriver à la connaissance du travail utile pour 1 tour de l'arbre. Alors au moyen d'une roue à bras on faisait faire à l'appareil un nombre déterminé de tours toujours à la même vitesse l'on mesurait l'échauffement.

Dans une expérience faite avec une spirale d'une résistance de 172,9, renfermée dans un calorimètre contenant $227^{gr},5$ d'eau, 1000 tours de l'appareil ont dégagé $2^{cal},6001$. La résistance totale était d'ailleurs de 305,9 ; la quantité de chaleur dégagée a donc été de $2^{cal},6001 \times \frac{305,9}{172,9} = 4^{cal},6002$. Le travail utile était $2161^k,5$.

Le quotient de ces deux nombres est 469,87.

Une autre expérience, faite dans des conditions analogues à celles-ci, mais avec une spirale plus forte et un calorimètre contenant 450 grammes d'eau, a donné 442 kilogrammètres.

Ces trois déterminations donnent comme moyenne, en nombre rond, 458 kilogrammètres pour l'équivalent mécanique de la chaleur, l'électricité servant d'intermédiaire. Ce nombre diffère très-peu de celui trouvé par Joule, par un procédé différent, qui consistait à faire tourner dans l'eau un électro-aimant ; il avait trouvé 460.

L'accord évident de ces deux nombres et leur désaccord avec le nombre obtenu directement par des expérimentateurs habiles frappent tout d'abord. Mais on peut expliquer que le nombre fourni par les expériences d'électricité doit se trouver trop fort ; une partie des effets nous échappe forcément : telle est la chaleur dégagée aux points de rupture du circuit, telles sont les modifications moléculaires permanentes que le courant peut apporter dans certaines portions des conducteurs ; n'oublions pas non plus les courants induits

Digitized by Google

déterminés par ceux de l'appareil dans les corps avoisinants.

Détermination d'un maximum de la quantité de travail nécessaire pour le dépôt de 1 *gramme de cuivre.* — L'expérience fut conduite comme précédemment : seulement, au lieu d'un calorimètre, c'était un voltamètre à sulfate de cuivre qui fermait le circuit. La résistance de ce voltamètre rempli d'une dissolution de cuivre neutre et bien pure, et formé par une large lame de platine placée entre deux lames de cuivre, avait été séchée en moyenne de soixante divisions du même rhéostat. Après 1600 tours de la machine, je trouvai sur la lame séchée à l'étuve un dépôt de $3^{gr},640$ de cuivre d'une belle couleur rosée, et offrant toutes les apparences d'un métal parfaitement pur et cohérent. Le travail utile total étant de $2947^{k},5$, la part afférente au voltamètre a dû être (résistance du circuit total $= 193$) de $2947,5 \times \frac{60}{193} = 916,32$ kilogrammètres, ou, par gramme de cuivre déposé, 252 kilogrammètres en nombre rond.

A quoi ont été employés ces 252 kilogrammètres? A échauffer le liquide, à vaincre l'affinité chimique, et aussi la cohésion. Mais dans quelle proportion chacun de ces effets s'est-il produit? Malheureusement les conditions de l'expérience ne sont pas telles, qu'il soit possible de le dire. Cependant on peut regarder l'affinité chimique comme ne devant pas intervenir, puisque le métal de l'électrode positif est le même que celui de la dissolution. Mais une portion du travail a dû se trouver absorbée par la dissolution de l'électrode qui était en cuivre plané, dont la cohésion est bien différente de celle du cuivre déposé. Ce qui semble l'indiquer, c'est que nous n'avons pas retrouvé dans les 4 litres de la dissolution les 2 calories représentées par les 916 kilogrammètres, qui eussent dû élever la température de $\frac{1}{2}$ degré. Or le thermomètre, qui donnait très-facilement $\frac{1}{20}$ de degré, n'a rien indiqué. Quant au refroidissement ou au réchauffement, ils n'ont pu être que très-faibles pendant

Digitized by Google

chrono
pouvait
moyen
cherchai
même
férence
1 tour d
faisait
toujours
Dans
de 172,9
d'eau, r
sistance
leur dég
Le trava
Le qu
Une a
gues à
calorim
logramm
Ces t
nombre
nique d
Ce nom
procédé
un électr
L'app

Digitized by Google

principe ci-dessus quelques conséquences intéressantes dont des expériences nouvelles me donneront peut-être la confirmation.

REMARQUES

A l'occasion de l'extrait d'un Mémoire de M. MAYER, inséré dans le cahier de juin 1857 des *Annales de Chimie et de Physique;*

PAR M. BOUSSINGAULT.

La conclusion principale du travail de M. Mayer est la suivante :

« 7°. Il existe une relation remarquable entre les » matières albuminoïdes et l'acide phosphorique que » renferment les graines. A une augmentation dans la » proportion d'acide phosphorique, correspond une aug- » mentation dans la proportion des matières albuminoïdes. » On peut donc admettre que la formation des matières » albuminoïdes dans les graines est subordonnée à l'exis- » tence des phosphates. »

Cette relation est sans doute très-remarquable, mais je crois devoir observer à M. Mayer qu'elle a été aperçue et signalée, il y a déjà bon nombre d'années, comme il pourra s'en assurer en lisant un passage ainsi conçu, dans mon *Économie rurale,* tome II, page 352, 2e édition :

« L'importance de l'intervention des principes inorga- » niques des aliments étant admise, il convient de tenir » compte de ces principes dans la composition de la ration » alimentaire : c'est dans ce but que j'ai cru devoir réunir » les quantités d'acide phosphorique et de chaux comprises » dans les aliments dont les cendres ont été analysées. » A l'aide de ces données, on voit tout de suite la quantité » de phosphate des os que peut contenir une ration.....

» J'ai fait figurer l'azote dans ce tableau pour montrer

Digitized by Google

» la relation qui existe entre la proportion de cette sub-
» stance et celle de l'acide phosphorique ; généralement les
» substances alimentaires les plus azotées sont aussi les
» plus riches en acide phosphorique, ce qui semble indi-
» quer que dans les produits de l'organisation végétale les
» phosphates appartiennent aux principes azotés, et qu'ils
» les suivent jusque dans l'organisation des animaux. »

NOTE SUR LA CONSTRUCTION D'UN PRISME BIRÉFRINGENT PROPRE A SERVIR DE POLARISEUR ;

PAR M. DE SENARMONT.

Tout prisme biréfrigent peut devenir un polariseur. Il suffit de laisser passer l'un des deux faisceaux réfractés et d'exclure l'autre au moyen d'un diaphragme.

Cet appareil donne d'autant plus de champ que les faisceaux divergent davantage.

On peut construire, avec du spath calcaire, des prismes biréfringents, qu'on trouvera bien souvent préférables aux prismes de Nicol. On sait, en effet, que les faces des rhomboèdres de clivage sont inclinées à l'axe optique d'environ 45° 23′ 30″. Si donc on accolle deux rhomboèdres par leurs faces naturelles, dans la situation renversée qui résulterait d'une hémitropie, leurs sections principales coïncident et leurs axes optiques sont inclinés de 90° 47′. Qu'on taille ensuite dans le premier cristal une face normale à son axe optique, et dans le second cristal une face parallèle à la première ; cette dernière face sera à très-peu près parallèle à l'axe optique du second rhomboèdre. L'ensemble constituera par conséquent, à quelque différence près dans la direction relative des axes optiques et des arêtes réfringentes, un prisme de Rochon. Tout rayon incident normalement à la première face pénétrera sans bifurcation et

Digitized by Google

donnera, à son entrée dans le second cristal, un rayon ordinaire polarisé parallèlement à l'arête réfringente, non dévié et parfaitement achromatique, puis un rayon extraordinaire, polarisé perpendiculairement au premier, dévié à l'émergence de 9 à 10 degrés et fortement dispersé.

Un pareil prisme sépare totalement les deux images et polarise complétement le champ d'une ouverture lumineuse de 15 millimètres de diamètre à 100 millimètres de distance. Le faisceau polarisé est pur, homogène et exempt de ces lueurs blanchâtres qui altèrent partiellement le champ d'un prisme de Nicol. Les rayons sont d'ailleurs normaux sur les faces d'entrée et de sortie, ce qui présente souvent des avantages.

La face normale à l'axe optique doit être tournée vers le rayon incident quand l'appareil fonctionne comme polariseur. On la tourne vers l'œil quand il sert d'analyseur.

La construction de ces prismes n'exige pas, à égalité de champ, du spath calcaire aussi volumineux que celle des prismes de Nicol. On imaginera d'ailleurs facilement le moyen d'en faire deux, avec deux rhomboèdres convenablement entre-taillés (1).

MÉMOIRES SUR LA CHIMIE PUBLIÉS A L'ÉTRANGER.

Extraits par M. Adolphe WURTZ.

...d... s de l'oxydation du sucre de lait dans des liqueurs ... es : par MM. Boedecker et Struckmann (2).

...e à une solution de sucre de lait cinq ... sulfate de cuivre dissous dans l'eau,

...parfaitement exécuté par M. Berthaud, opti-

Pharmacie, tome C, page 264 (nouvelle série,

Digitized by Google

et ensuite de la soude caustique, il se forme d'abord un précipité qu'un excès de soude redissout en grande partie. Cette liqueur étant soumise à l'ébullition, l'oxyde de cuivre est réduit, comme l'on sait, et il se précipite du protoxyde de cuivre hydraté. La liqueur filtrée est jaune; évaporée, elle laisse déposer le sulfate de soude : l'eau mère, mélangée avec du sable et desséchée complétement, cède à l'alcool deux sels de soude : l'un est précipitable par l'acétate de plomb; l'autre, qui reste en solution, est précipitable par le sous-acétate de plomb. Des deux acides qui s'unissent à l'oxyde de plomb dans ces circonstances, et qui sont les seuls produits de cette réaction, l'un se forme surtout lorsqu'il y a un excès d'oxyde de cuivre dans la liqueur alcaline. C'est l'acide gallactique, $C^{14} H^{8} O^{7}$, 2HO, ainsi nommé en raison d'une analogie de composition avec l'acide gallique. L'autre acide qui se forme par suite d'une oxydation moins complète, et qui est précipité par le sous-acétate de plomb, est l'acide pectolactique. Il renferme $C^{16} H^{6} O^{10}$, 2HO, et semble se rapprocher de l'acide métapectique par sa composition et par ses propriétés.

Ces deux acides sont d'ailleurs mal définis ; ils sont sirupeux et ne forment avec aucune base une combinaison cristallisable.

Sur la Huanoquine, nouvel alcaloïde du quinquina; par M. A. Erdmann (1).

Le *China de Huanuco plana* (2) renferme un alcaloïde différent de la quinine, de la quinidine et de la cinchonine, et qui a été désigné sous le nom de *huanoquine*. Pour l'isoler, on a épuisé 2 kilogrammes d'écorce de huanuco grossièrement pulvérisée par l'eau aiguisée d'acide chorhydrique

(1) *Annalen der Chemie und Pharmacie*, tome C, page 341 (nouvelle série, tome XXIV, décembre 1856).

(2) Voyez *Quinologie* de MM. Delondre et Bouchardat, page 27.

Digitized by Google

bouillant. Les décoctions, convenablement évaporées, ont été précipitées par la soude caustique, jusqu'à réaction faiblement alcaline. Le précipité recueilli et lavé a été redissous dans l'acide acétique et reprécipité par la soude. Le dépôt blanc ainsi obtenu a été mis en digestion avec de l'alcool à 80 centièmes, et les liqueurs alcooliques concentrées par la distillation ont été abandonnées à la cristallisation. On a obtenu ainsi de petits cristaux brillants différents de ceux que fournissent ordinairement les écorces de quinquina. Ces cristaux constituent la nouvelle base.

A l'état de pureté, la huanoquine forme de petits prismes incolores; elle n'a aucune saveur et possède une réaction faiblement alcaline, qui est assez prononcée dans sa dissolution alcoolique. Elle est fusible et se prend par le refroidissement en une masse cristalline. A une température plus élevée elle se sublime; elle brûle avec une flamme fuligineuse. Insoluble dans l'eau, elle exige pour se dissoudre à 17 degrés 400 parties d'alcool de 80 centièmes. Il faut 110 parties d'alcool pour la dissoudre (1). Elle se dissout dans 600 parties d'éther à 17 degrés, et dans 470 parties d'éther bouillant.

Elle forme avec l'acide sulfurique un sel à peine soluble dans l'eau, mais qui se dissout facilement dans un excès d'acide.

Le chlorhydrate est très-soluble et cristallise en gros prismes transparents. Sa saveur est amère.

Le sel double de platine forme un précipité jaune clair, et cristallise. Il se dissout dans un excès de chlorure de platine et se dépose en cristaux.

Une analyse faite par M. Gössmann a démontré que la huanoquine est isomérique avec la cinchonine.

---

(1) La forme des cristaux et l'action de la solution alcoolique sur la lumière polarisée n'ayant pas été déterminées, cette faible solubilité dans l'alcool est à peu près le seul caractère qui distingue la nouvelle base de la cinchonine. (A. W.)

Digitized by Google

Elle renferme, comme cette base, $C^{10} H^{12} Az O$, formule qu'il faut probablement doubler. Elle paraît être fébrifuge.

Sur une combinaison cristallisable de l'Acide chromique avec l'oxyde de cuivre; par M. F. Droege (1).

Lorsque l'on traite l'hydrate d'oxyde de cuivre par une solution d'acide chromique, on obtient un précipité rouge-brun et une liqueur brune, qui, abandonnée à l'évaporation spontanée, laisse d'abord déposer des cristaux verts; concentrée davantage, elle se recouvre d'une croûte formée par de beaux cristaux d'un brun noir. Ces derniers cristaux renferment

$$2\,CrO^3,\ CuO,\ 2\,HO.$$

Sur un Nouveau mode de préparation du phosphure d'azote; par M. Pauli (2).

On mélange intimement dans un mortier du quintisulfure de phosphore pulvérulent avec un excès de sel ammoniac; on introduit ce mélange dans une cornue non tubulée que l'on chauffe à l'aide d'une bonne lampe à gaz. Il se dégage d'abord de l'acide chlorhydrique et un peu d'hydrogène sulfuré; puis il se sublime successivement du sel ammoniac et du sulfhydrate d'ammoniaque, et l'on obtient pour résidu une masse jaunâtre et très-légère, qui constitue le phosphure d'azote mélangé encore avec du sel ammoniac. Pour l'en débarrasser, on le pulvérise avec soin et on le chauffe à plusieurs reprises, jusqu'à ce que le sel ammoniac soit entièrement volatilisé.

On peut aussi obtenir du phosphure d'azote en chauffant à plusieurs reprises un mélange de phosphore amorphe, de fleurs de soufre en excès et de chlorhydrate d'ammoniaque.

---

(1) *Annalen der Chemie und Pharmacie*, tome CI, page 39 (nouvelle série, tome XXV, janvier 1857).

(2) *Annalen der Chemie und Pharmacie*, tome CI, page 41 (nouvelle série, tome XXV, janvier 1857).

Digitized by Google

Le phosphure d'azote ainsi obtenu est une poudre jaunâtre insoluble dans l'eau. Il n'est pas attaqué par l'acide nitrique fumant. Chauffé avec de l'hydrate de potasse, il dégage de l'ammoniaque en abondance. L'hydrogène sulfuré le décompose au rouge en sulfure de phosphore et en ammoniaque. Chauffé avec du zinc jusqu'au point de fusion de ce métal, il laisse dégager de l'ammoniaque; ce qui prouve que le produit renferme de l'hydrogène au nombre de ses éléments. En effet, d'après des analyses multipliées, sa composition est représentée par la formule

$$P\,Az^2\,H.$$

Préparation de l'Acide pyrogallique; par M. Liebig (1).

On mélange de l'acide gallique bien sec avec le double de son poids de pierre ponce grossièrement pulvérisée, on introduit ce mélange dans une cornue tubulée de manière qu'il n'en remplisse que le quart. La cornue plonge presque jusqu'au col dans un bain de sable ; la tubulure donne passage à un tube de dégagement destiné à amener dans la cornue un courant d'acide carbonique. On adapte un récipient au col de la cornue, et on chauffe. L'acide pyrogallique se sublime en lamelles longues et brillantes dans le col de la cornue. Une petite quantité passe dans le récipient à l'état de dissolution concentrée. En réglant convenablement la chaleur et le courant de gaz carbonique, on obtient une quantité d'acide pyrogallique qui représente 31 ou 32 pour 100 du poids de l'acide gallique employé.

Sur l'identité de la Phaséomannite avec l'Inosite; par M. Vohl (2).

Le procédé le plus simple pour préparer la phaséomannite consiste à épuiser des haricots récoltés avant leur maturité,

---

(1) *Annalen der Chemie und Pharmacie*, tome CI, page 47 (nouvelle série, tome XXV, janvier 1857)

(2) *Annalen der Chemie und Pharmacie*, tome CI, page 50 (nouvelle série, tome XXV, janvier 1857).

Digitized by Google

par l'eau, à évaporer les solutions au bain-marie en consistance sirupeuse, et à ajouter de l'alcool à cet extrait jusqu'à formation d'un précipité persistant. La liqueur, abandonnée pendant quelques jours à elle-même, laisse déposer d'abondantes croûtes cristallines, que l'on recueille et que l'on redissout dans l'eau ; la solution aqueuse donne par l'évaporation spontanée de très-belles tables rhomboïdales parfaitement incolores.

Ces cristaux s'effleurissent à l'air sec ; à 100 degrés, ils perdent 16,7 pour 100 d'eau de cristallisation ; à une température plus élevée, ils fondent sans éprouver de décomposition. Leur solution ne réduit les sels de cuivre, en présence d'un alcali, ni à froid, ni à chaud. Soumise à l'analyse, la substance déshydratée a donné des nombres qui s'accordent parfaitement avec la formule $C^{12} H^{12} O^{12}$. La phaséomannite cristallisée renferme $C^{12} H^{12} O^{12} + 4 HO$. Cette composition est exactement celle que présente l'inosite, matière sucrée, trouvée dans les muscles par M. Scherer, et que M. Cloetta a rencontrée depuis dans divers tissus et liquides de l'économie. Comme la matière sucrée des haricots, l'inosite ne réduit pas les sels de cuivre. Un moyen facile de découvrir et de caractériser cette dernière substance consiste, comme l'on sait, à en traiter une petite quantité par l'acide nitrique, à évaporer sur une lame de platine, et à ajouter au produit obtenu du chlorure de calcium et de l'ammoniaque. Il se développe dans ces circonstances une belle coloration rose. La phaséomannite se comporte de la même manière. Cette réaction est subordonnée sans doute à la formation d'un corps nitré, qu'il est d'ailleurs très-facile d'obtenir en dissolvant la phaséomannite dans l'acide nitrique concentré et en ajoutant de l'acide sulfurique à la solution. Il se sépare une substance pulvérulente ou oléagineuse, et l'on obtient par le refroidissement une matière cristalline qu'on lave avec de l'eau. C'est la nitro-inosite, substance pulvérulente, cristalline, explosive,

Digitized by Google

insoluble dans l'eau et soluble dans l'alcool. Lorsque l'on traite cette matière par l'acide nitrique sur une lame de platine, que l'on ajoute de l'ammoniaque et du chlorure de calcium, elle développe la teinte rose caractéristique de l'inosite.

Sur le Bisulfure de bismuth et sur le tri-iodure de bismuth; par M. Schneider (1).

M. Schneider obtient le bisulfure de bismuth par le procédé suivant :

On dissout dans la potasse caustique 8 grammes de tartrate de bismuth (2). On étend cette solution avec une quantité d'eau suffisante pour former 1500 centimètres cubes.

On ajoute à cette liqueur une solution de 2 grammes de protochlorure d'étain dans la potasse caustique. Cette addition a pour but de réduire l'oxyde de bismuth BiO^3 en oxydule (3) BiO^2. On fait passer de l'hydrogène sulfuré à travers la liqueur brune. Il ne se précipite que du sulfure de bismuth, le sulfure d'étain restant en solution dans la liqueur alcaline. La poudre noire ainsi obtenue, après avoir été lavée à l'eau alcaline d'abord, puis à l'eau chaude, et séchée au bain-marie, paraît constituer un hydrate de bisulfure de bismuth $BiS^2 + 2HO$.

---

(1) *Annalen der Chemie und Pharmacie*, tome CI, p. 61, et *Poggendorff's Annalen*, tome XCVII, page 480.

(2) M. Schneider a obtenu cette combinaison en mélangeant des solutions chaudes et concentrées de nitrate de bismuth et d'acide tartrique. Le tartrate de bismuth se dépose par le refroidissement en petits cristaux brillants.

(3) M. Schneider obtient l'oxydule de bismuth BiO^2 par le procédé suivant : On dissout dans l'acide chlorhydrique équivalents égaux d'oxyde de bismuth BiO^3 et de protochlorure d'étain, et on verse cette solution dans de la potasse caustique moyennement concentrée. On obtient un précipité volumineux brun-noir d'acide stannique et d'oxydule de bismuth. La potasse concentrée enlève à ce précipité tout l'acide stannique, et laisse l'oxydule de bismuth. Séché dans le vide à 100 degrés, l'oxydule de bismuth est une poudre cristalline d'un noir gris, et qui, chauffée à l'air, brûle en se transformant en oxyde blanc. (*Poggendorff's Annalen*, t. LXXXVIII, p. 45.)

Digitized by Google

Traité par l'acide chlorhydrique, ce sulfure dégage de l'hydrogène sulfuré. Il se dissout du chlorure de bismuth, et il reste du bismuth métallique. Pour obtenir le tri-iodure de bismuth, on chauffe dans un ballon un mélange intime de 32 parties (1 équivalent) de trisulfure de bismuth avec 47,3 parties (3 équivalents) d'iode. La masse fond d'abord, et à une température plus élevée il s'en dégage des vapeurs rouge-brun qui se condensent à la partie supérieure du ballon en lames brillantes d'iodure de bismuth. Le soufre se dégage et se transforme partiellement en acide sulfureux.

L'iodure de bismuth ainsi obtenu forme des grandes lames brillantes, minces, d'un gris noir. Chauffé à l'air, il se volatilise en grande partie en laissant un résidu de sous-iodure de bismuth. L'eau froide ne l'altère pas sensiblement ; l'eau bouillante le décompose en laissant du sous-iodure. Les alcalis l'attaquent en formant de l'oxyde et de l'iodate de bismuth. Les sulfures métalliques le décomposent rapidement en sulfure; l'acide chlorhydrique le dissout sans le décomposer sensiblement. Il renferme BiI^3.

Sur la constitution du Fulminate de mercure; par M. A. Kékulé (1).

Dans son *Précis de Chimie organique*, Gerhardt a émis l'opinion que l'acide fulminique dérivait d'un corps C^4H^3Az (acétonitrile), par la substitution de 1 équivalent de vapeur nitreuse à 1 équivalent d'hydrogène. La formule

$$C^4H^2(AzO^4)Az$$

exprime d'après lui la constitution de l'acide fulminique. Cette hypothèse expliquait parfaitement les propriétés explosives des fulminates, sans rendre compte d'une manière aussi satisfaisante de la production de combinaisons cyaniques

(1) *Annalen der Chemie und Pharmacie*, tome CI, page 200 (nouvelle série, tome XXV, février 1857).

Digitized by Google

dans presque toutes les réactions auxquelles on peut soumettre ces sels. Ce dernier fait semble indiquer la présence du cyanogène parmi les éléments de l'acide fulminique. S'il en est ainsi, on peut admettre que dans cet acide la moitié de l'azote est contenu sous la forme de vapeur nitreuse (AzO^4), et que l'autre moité est combinée à du carbone sous forme de cyanogène. Dans cette hypothèse, la formule du fulminate de mercure deviendrait $C^2(AzO^4)(C^2Az)Hg^2$, et l'acide fulminique viendrait se ranger parmi les substances nombreuses qui ont pour type le gaz des marais ou le chloroforme. Les formules suivantes développent ce rapprochement :

Gaz des marais.....	C^2HHHH,
Chlorure de méthyle.....	C^2HHHCl,
Chloroforme.....	$C^2HClClCl$,
Chloropicrine.....	$C^2(AzO^4)ClClCl$,
Huile de Marignac.....	$C^2(AzO^4)(AzO^4)ClCl$,
Bromopicrine.....	$C^2(AzO^4)BrBrBr$,
Acétonitrile.....	C^2HHHC^2Az,
Trichloro-acétonitrile.....	$C^2ClClCl(C^2Az)$,
Fulminate de mercure....	$C^2(AzO^4)HgHg(C^2Az)$,
Acide fulminique.....	$C^2(AzO^4)HH(C^2Az)$.

Si ces idées sur la constitution du fulminate de mercure sont exactes, on pouvait prévoir que l'action du chlore sur ce sel donnerait naissance à du chlorure de cyanogène, du chlorure de mercure, et à de la chloropicrine. L'expérience a confirmé en partie ces prévisions. Lorsque l'on dirige un courant de chlore dans du fulminate de mercure délayé dans l'eau en agitant fréquemment, ce sel se dissout peu à peu, et il reste une quantité considérable d'une huile jaune. La liqueur aqueuse renferme en solution du chlorure de cyanogène gazeux et du sublimé corrosif. Le produit huileux jaune ayant été soumis à la distillation, une portion considérable a passé à la distillation à

Digitized by Google

des températures voisines du point d'ébullition de la chloropicrine. Mais il a été impossible d'obtenir un produit à point d'ébullition fixe. Néanmoins, les analyses qui ont été faites avec une portion du liquide qui avait passé vers 110 degrés, rendent probable que ce liquide était formé en grande partie par de la chloropicrine mélangée avec une petite quantité de chlorure de carbone C^2Cl^4. D'après ce qui précède, la décomposition du fulminate de mercure par le chlore, peut être exprimée par l'équation suivante :

$$\underbrace{C^2(AzO^4)CyHg^2}_{\text{Fulminate de mercure.}} + 3\,Cl^3 = \underbrace{C^2(AzO^4)Cl^3}_{\text{Chloropicrine.}} + CyCl + 2\,HgCl.$$

Ce fait de la formation de la chloropicrine dans l'expérience précédente est d'ailleurs confirmé par la facilité avec laquelle la chloropicrine se forme, et peut être obtenue à l'état de pureté par l'action du chlorure de chaux sur le fulminate de mercure. La production de ce corps nitré dans les circonstances qui viennent d'être indiquées, fournit une preuve certaine de la présence des éléments de l'acide hyponitreux dans le fulminate de mercure lui-même.

L'action que l'hydrogène sulfuré exerce sur ce sel paraît fournir un autre argument en faveur de la formule rationnelle $C^2(AzO^4)CyHg^2$. Il se forme en effet dans cette réaction du sulfocyanure d'ammonium et de l'acide carbonique :

$$\underbrace{C^2(AzO^4)CyHg^2}_{\text{Fulminate de mercure.}} + 2\,H^2S^2 = 2\,HgS^2 + C^2O^4 + \underbrace{\left\{\begin{matrix}Cy\\AzH^4\end{matrix}\right\}S^2}_{\text{Sulfocian. d'amm.}}.$$

Enfin, cette formule rationnelle permet de rendre compte de la formation de l'acide isocyanurique de M. Schischkoff (fulminurique de M. Liebig). On peut admettre que dans cette réaction deux molécules d'acide fulminique fixent les éléments de l'eau et se dédoublent en acide isocya-

Digitized by Google

nurique, acide carbonique et ammoniaque :

$$\underbrace{2\,C^2(Az\,O^4)\,Cy\,H^2}_{\text{Acide fulminique.}} + H^2\,O^2 = \underbrace{C^2(Az\,O^4)\,H^2\,Cy.Cy\,HO^2}_{\text{Acide isocyanurique.}} + C^2\,O^4 + Az\,H^3.$$

Préparation de l'Acide molybdique cristallisé à l'aide du molybdène sulfuré ; par M. Wœhler (1).

Le moyen le plus simple de préparer l'acide molybdique pur et sublimé en cristaux brillants consiste à introduire le sulfure de molybdène natif dans un tube de verre, et à le chauffer dans un courant d'air déterminé à l'aide d'un aspirateur, jusqu'à ce que les dernières traces de sulfure se soient oxydées.

MÉMOIRES SUR LA PHYSIQUE PUBLIÉS A L'ÉTRANGER.

EXTRAITS PAR M. VERDET.

Principes d'une nouvelle théorie des Gaz ; par M. Krœnig (2).

D'après la théorie mécanique de la chaleur, la chaleur ne serait autre chose que le mouvement des molécules des corps ; mais jusqu'ici on ne s'est pas fait une idée nette de la nature de ce mouvement. Je me propose de développer

(1) *Annalen der Chemie und Pharmacie*, tome C, page 576.

(2) *Poggendorff's Annalen*, tome XCIX, page 315, octobre 1856. Le Mémoire de M. Krœnig et celui de M. Clausius que nous publions à la suite sont les tentatives les plus récentes que l'on ait faites pour appliquer à la théorie de la constitution des corps les idées nouvelles sur la nature de la chaleur. En raison de la nature du sujet, nous donnons, au lieu d'un extrait, une traduction textuelle, sauf quelques suppressions, du premier de ces deux Mémoires. On reconnaîtra sans doute que le Mémoire de M. Krœnig ne contient rien d'essentiel qui ne soit déjà dans le Mémoire de M. Joule, inséré au précédent cahier de ces *Annales*. (V.)

Digitized by Google

dans cette Note une hypothèse sur la nature des gaz, qui me paraît satisfaire à toutes les conditions du problème, qui, en particulier, explique la loi de Mariotte, la loi de Gay-Lussac, et les autres lois des fluides élastiques. Cette hypothèse est la suivante.

Les gaz sont composés d'atomes qui se comportent comme des sphères solides, parfaitement élastiques et animées de certaines vitesses. Les corps solides ou liquides se comportent aussi comme des corps parfaitement élastiques par rapport aux chocs des atomes gazeux, quand le gaz est en équilibre ou du moins dans un état permanent.

Concevons une caisse à parois parfaitement élastiques, contenant un certain nombre de sphères parfaitement élastiques qui, dans l'état de repos, n'occupent qu'une très-petite partie de l'intérieur de la caisse, et supposons que l'on agite la caisse violemment, de manière à mettre toutes les sphères en mouvement. Si la caisse revient au repos, les sphères conserveront indéfiniment leur mouvement, bien que le mouvement de chaque sphère en particulier change sans cesse par suite de chocs contre les autres sphères ou contre les parois. Les atomes des gaz contenus dans un vase solide se comportent comme ces sphères.

Ainsi les atomes d'un gaz n'oscillent pas autour de positions fixes d'équilibre, mais ils se meuvent en ligne droite et avec une vitesse constante, aussi longtemps qu'ils ne se heurtent pas contre d'autres atomes, ou contre une paroi solide ou liquide. Entre deux atomes qui ne se touchent pas, il n'y a point de répulsion.

Par rapport aux atomes d'un gaz, la paroi la plus plane doit être considérée comme extrêmement raboteuse, et par suite la trajectoire de chaque atome doit être tellement complexe, qu'elle échappe entièrement au calcul. Mais en vertu des principes du calcul des probabilités, il est permis de substituer à cette irrégularité complète une régularité absolue.

Digitized by Google

Soit un vase solide de forme parallélipipédique contenant n atomes gazeux de masse m, et désignons par x, y, z les trois dimensions du parallélipipède. Divisons la capacité du vase en $\frac{n}{6}$ cubes égaux, et concevons que chacun de ces cubes contienne à un instant donné six atomes animés d'une vitesse constante c, de telle manière que deux atomes se meuvent parallèlement à chaque côté du parallélipipède, et en sens contraire l'un de l'autre. Admettons que les divers atomes ne se rencontrent pas, et que chacun d'eux continue sans obstacle son mouvement jusqu'à la paroi (1), et cherchons la pression exercée sur l'une des parois.

Cette pression résulte des chocs des atomes du gaz contre la paroi. Si un seul atome rencontrait la paroi, la pression serait proportionnelle à a, a désignant le nombre des chocs pendant l'unité de temps. D'ailleurs si l'on désigne par z la dimension du parallélipipède perpendiculaire à la paroi, il est facile de voir que chaque atome mobile parallèlement à cette dimension doit rencontrer la paroi considérée toutes les fois qu'il a parcouru un chemin égal à $2z$; d'où il suit que l'on a $a = \frac{c}{2z}$. On trouvera la pression totale P, en multipliant mca par le nombre des atomes qui se meuvent parallèlement au côté z, savoir $\frac{n}{3}$, et en divisant par l'étendue xy de la paroi, on aura la pression rapportée à l'unité de surface

$$p = mc \frac{c}{2z} \frac{n}{3} \frac{1}{xy},$$

ou, en désignant par v le volume xyz du parallélipipède,

$$p = \frac{1}{6} \frac{nmc^2}{v}.$$

(1) Les atomes dont les centres se meuvent suivant une même droite, se comportent comme s'ils ne se rencontraient jamais, car à chaque rencontre ils ne font qu'échanger leurs vitesses.

Digitized by Google

Cette expression montre que la pression du gaz contre l'unité de surface de chaque paroi est la même, et que conformément à la loi de Mariotte elle est en raison directe du rapport de la masse au volume, c'est-à-dire de la densité.

En outre des hypothèses précédentes, j'admettrai que la force vive mc^2 d'un atome de gaz n'est autre chose que sa température comptée à partir du zéro absolu.

D'après la loi de Gay-Lussac, un gaz n'exercerait aucune pression à la température de — 273 degrés centigrades, et à la température t, son volume étant supposé constant, sa pression serait proportionnelle à $273 + t$. Cela résulte de la formule précédente, si l'on admet que mc^2 soit égal à $273 + t$. Nous représenterons simplement par t cette température absolue, comptée à partir de — 273 degrés.

Si pour deux gaz différents on suppose que p, t et ν aient la même valeur, on voit que n doit être le même. En d'autres termes, à la même pression et à la même température des volumes égaux de gaz différents contiennent des nombres égaux d'atomes.

Il suit de là que la masse m d'un atome est proportionnelle à la pesanteur spécifique s du gaz.

J'ai considéré jusqu'ici les gaz comme renfermés en vases clos, et j'ai négligé l'influence de la pesanteur. Je vais maintenant déterminer la pression qu'un seul atome de gaz exerce contre la surface de la terre ; on pourrait croire au premier abord qu'elle dépend de la température, mais il est facile de voir qu'il n'en est rien.

Supposons en effet qu'à l'époque o, l'atome s'éloigne de la surface de la terre avec une vitesse dont la composante verticale est égale à c. Il parviendra au point le plus haut de sa course au bout du temps $\frac{c}{g}$ (g désigne comme de coutume l'intensité de la pesanteur), et il retombera à la surface au bout du temps $\frac{2c}{g}$ avec une vitesse verticale encore

Digitized by Google

égale à c. Le nombre des chocs dans l'unité de temps sera donc égal à $\frac{g}{2c}$, et par suite la pression exercée contre la terre sera proportionnelle à $mc\frac{g}{2c}$ ou $\frac{mg}{2}$. Elle sera donc indépendante de la vitesse, c'est-à-dire de la température.

Il faut encore déterminer la différence des pressions qu'un atome exerce sur deux parois horizontales, séparées l'une de l'autre par une distance verticale z. Supposons que l'atome s'éloigne de la partie inferieure à l'époque o avec une vitesse dont la composante verticale est c. Si la paroi supérieure n'existait pas, l'atome parviendrait au bout du temps $\frac{c}{g}$ à une hauteur $\frac{c^2}{2g}$, avec une vitesse nulle. Si z est plus grand que $\frac{c^2}{2g}$, c'est encore ainsi que les choses se passent, l'atome exerce sur la paroi inférieure une pression proportionnelle à $\frac{mg}{2}$, sur la paroi supérieure une pression nulle, et la différence de ces pressions est $\frac{mg}{2}$. Si z est moindre que $\frac{c^2}{2g}$, l'atome rencontre la paroi supérieure au bout du temps $\frac{c-\sqrt{c^2-2gz}}{g}$, avec une vitesse verticale égale à $\sqrt{c^2-2gz}$. Comme d'ailleurs le nombre des chocs de l'atome contre chacune des parois est pendant l'unité de temps égal à $\frac{g}{2(c-\sqrt{c^2-2gz})}$, l'atome exerce sur la paroi inférieure une pression égale à $\frac{mcg}{2(c-\sqrt{c^2-2gz})}$, et sur la paroi supérieure une pression égale à $\frac{m\sqrt{c^2-2gz}\,.\,g}{2(c-\sqrt{c^2-2gz})}$; la différence de ces deux pressions est encore égale à $\frac{mg}{2}$. La composante horizontale de la vitesse des atomes n'ayant

Digitized by Google

d'ailleurs aucune influence, on voit que la résultante des premières est proportionnelle au produit de $\frac{mg}{2}$ par le nombre des atomes, c'est-à-dire au poids du gaz.

On peut déduire de ceci que le principe d'Archimède est applicable aux gaz, et que le gaz le plus léger doit s'élever au-dessus du gaz le plus lourd, et *vice versâ*.

..... Si la température d'un gaz est égale à la force vive d'un de ses atomes, la quantité totale de chaleur Q contenue dans un gaz doit être égale à la force vive de la totalité de ses atomes. On a donc $Q = n\,mc^2 = nt$. Il suit de là qu'à la même pression et à la même température des volumes égaux de tous les gaz contiennent des quantités égales de chaleur.

En différentiant l'équation $Q = nt$, on voit que tous les gaz ont une même chaleur spécifique rapportée au volume et que cette chaleur spécifique est constante.

Des expériences précises ont montré, comme l'on sait, que la plupart des lois précédentes ne sont pas absolument exactes. Il est facile d'en comprendre la raison. On a admis dans ce qui précède, que les divers atomes ne se contrarient pas dans leur mouvement, que chaque atome parcourt par exemple indéfiniment et avec une vitesse constante la distance de deux parois parallèles. Mais en réalité deux atomes qui se rencontrent ne se traversent pas ; ils se choquent, et en vertu de leur élasticité et de l'égalité de leur masse ils échangent leurs vitesses... Trois cas sont possibles suivant la longueur du temps nécessaire à la réaction élastique des deux atomes. Le nombre des chocs des atomes contre la paroi peut demeurer exactement le même que dans l'hypothèse précédente; il peut être un peu plus grand ou un peu plus petit. Dans le premier cas, la formule donnée pour représenter la pression est parfaitement exacte ; dans le second cas, la pression est plus grande que $\frac{nmc^2}{v}$;

Digitized by Google

dans le troisième cas, elle est plus petite. Des considérations analogues s'appliquent à plusieurs des lois précédemment développées.

Les variations de température qui accompagnent les changements de volume des gaz s'expliquent avec la même facilité.

Soient deux vases de même volume séparés par une paroi commune, dont le premier contienne n atomes, de masse m et de vitesse c, et le second soit vide. On supprime une partie w de la paroi. Les atomes qui dans leur mouvement seraient venus choquer cette portion de la paroi traversent l'ouverture, pénètrent dans le second vase, et en se réfléchissant sur les parois de celui-ci se répandent dans tous les sens, de sorte qu'il y a bientôt équilibre et égalité de pression dans les deux vases. Mais il est évident que c, et par suite mc^2, sont demeurés invariables. Il résulte de là que si un gaz se dilate sans rencontrer de résistance, il n'éprouve aucun changement de température.

Si au contraire les atomes du gaz rencontrent un piston mobile, ils doivent perdre autant de leur force vive qu'ils en communiquent au piston. Leur température doit donc s'abaisser.

Enfin si un gaz est comprimé par un piston, les atomes qui rencontrent le piston doivent acquérir une plus grande vitesse que celle qu'ils possédaient. De là l'élévation de température.

Mémoire sur la nature du mouvement appelé CHALEUR ; par M. Clausius (1).

En même temps qu'il s'occupait de développer les conséquences du principe de l'équivalence de la chaleur et du travail mécanique, envisagé simplement comme une donnée expérimentale, M. Clausius cherchait à se faire quelque

(1) *Poggendorff's Annalen*, tome C, page 353, mars 1857.

Digitized by Google

idée de la nature des mouvements dont la force vive est ce que l'on appelle une quantité de chaleur. La publication du travail de M. Krönig sur la théorie des gaz l'a engagé à faire connaître ses vues personnelles, tout incomplètes qu'elles lui parussent encore.

M. Clausius définit un gaz de la même manière que M. Krönig; mais il fait remarquer que le mouvement de translation rectiligne des molécules gazeuses n'est pas le seul qui doive exister, et ne doit pas en conséquence être uniquement considéré dans l'estimation de la force vive qui constitue la chaleur contenue dans le gaz. Il y a nécessairement des mouvements de rotation des molécules sur elles-mêmes, le choc des molécules les unes contre les autres ne pouvant être toujours central et direct, et il peut y avoir dans l'intérieur de chaque molécule des vibrations de ses atomes; enfin il n'est pas impossible que chaque molécule soit environnée d'une certaine quantité d'une matière plus rare qui prenne part aussi au mouvement.

Les mouvements de translation des molécules et les mouvements vibratoires des éléments des molécules sont toujours dans un rapport constant pour un gaz déterminé. En effet, si l'on concoit un certain nombre de molécules dépourvues de tout mouvement de translation, mais composées d'éléments en vibration incessante, les mouvements de translation naîtront d'eux-mêmes par suite des chocs que les mouvements des éléments occasionnent entre les molécules contiguës. Inversement, s'il n'y a d'abord que des mouvements de translation, le choc des molécules contre d'autres molécules ou contre les parois, ne peut manquer d'engendrer des vibrations dans les éléments des molécules, et dans les deux cas le système doit tendre vers un état stationnaire, caractérisé par un rapport invariable entre les deux espèces de mouvements. Ce rapport dépend d'ailleurs évidemment de la nature des molécules.

Si deux molécules, dont les éléments sont en mouve-

Digitized by Google

ment, viennent à se rencontrer, elles ne se comportent pas en général suivant les règles du choc des corps élastiques, et la direction et la grandeur de leurs vitesses après le choc dépendent non-seulement de leurs vitesses initiales, mais aussi de l'état de mouvement où se trouvent les éléments les plus rapprochés à l'instant du choc. Néanmoins lorsque le système est parvenu à un état stationnaire, on peut négliger les irrégularités et admettre que tout se passe comme si le choc des molécules les unes contre les autres avait lieu conformément aux lois ordinaires du choc des corps élastiques.

Pour que l'état gazeux soit parfait, quelques conditions sont nécessaires. Premièrement, l'espace réellement occupé par les molécules du gaz doit être extrêmement petit par rapport au volume total de la masse gazeuse. En second lieu, la durée d'un choc doit être extrêmement petite par rapport à l'intervalle qui s'écoule entre deux chocs successifs. Troisièmement enfin, l'influence des forces moléculaires doit être négligeable. Cette condition elle-même en implique deux autres : il faut d'abord que la distance moyenne des molécules soit assez grande, et ensuite que la durée du temps pendant lequel deux molécules quelconques sont assez rapprochées pour que les forces moléculaires aient une action sensible, soit très-petite par rapport à la durée du temps pendant lequel les forces moléculaires exercent une action négligeable.

Si ces conditions sont satisfaites, on peut démontrer que les lois de Mariotte et de Gay-Lussac sont des conséquences nécessaires de l'hypothèse précédente relative à l'état gazeux. Dans cette démonstration, malgré la complication réelle des mouvements, on peut les supposer réduits au degré de simplicité où les a réduits M. Krönig. Par exemple, si l'on veut déterminer la pression exercée sur une paroi solide, on pourra supposer que les molécules ne se gênent pas réciproquement, et que par conséquent chaque molé-

Digitized by Google

cule se meut en ligne droite avec une vitesse constante, tant qu'elle ne rencontre pas une paroi. On pourra de plus négliger l'influence des aspérités de la paroi et des irrégularités du choc, et admettre que chaque molécule se réfléchit absolument comme une bille parfaitement élastique qui rencontre une paroi solide parfaitement plane. Le calcul fondé sur ces hypothèses simplifiées donnera le même résultat qu'un calcul où l'on tiendrait compte de la complication réelle des phénomènes.

M. Clausius considère en particulier un gaz renfermé dans un vase cylindrique dont la hauteur est très-petite par rapport au diamètre des bases, de façon que l'on puisse négliger les chocs, relativement très-peu nombreux, des molécules contre les parois latérales. Si l'on considère en particulier une molécule animée de la vitesse u et mobile suivant une direction inclinée d'un angle θ sur la normale aux bases du cylindre, il est facile de voir par des raisonnements semblables à ceux de M. Krönig, que cette molécule devra rencontrer l'une des bases pendant chaque unité de temps, un nombre de fois égal à $\frac{u\cos\theta}{2h}$, h désignant la hauteur du cylindre. Si n est le nombre total des molécules, comme on peut supposer les vitesses également distribuées suivant toutes les directions, le nombre des molécules dont les vitesses feront avec la normale aux bases des angles compris entre θ et $\theta + d\theta$ sera $n\sin\theta\, d\theta$, et par suite le nombre de leurs chocs contre une des bases $\frac{nu}{2h}\cos\theta\sin\theta\, d\theta$.

Par suite du choc, la composante parallèle aux bases de la vitesse de chaque molécule n'est pas modifiée, et la composante normale $u\cos\theta$ change de signe ; en d'autres termes, la paroi communique à chaque molécule une vitesse normale égale à $2u\cos\theta$, et par conséquent une quantité de mouvement égale à $2mu\cos\theta$, si m désigne la masse de la molécule. La quantité de mouvement communiquée pen-

Digitized by Google

dant l'unité de temps aux molécules qui rencontrent la paroi sous des incidences comprises entre θ et $\theta + d\theta$ est donc

$$\frac{nmu^2}{h} \cos^2\theta \sin\theta \, d\theta,$$

et la quantité de mouvement communiquée à la totalité des molécules qui rencontrent la paroi pendant l'unité de temps est l'intégrale de l'expression précédente, prise entre o et $\frac{\pi}{2}$, savoir $\frac{nmu^2}{3h}$. Si l'on suppose la paroi mobile, il faudra, pour l'empêcher de se déplacer sous l'influence des chocs des molécules, faire agir sur elle une force qui, pendant l'unité de temps, lui restitue une quantité de mouvement égale à l'expression précédente. Cette force, qui n'est autre chose que ce que l'on appelle la pression du gaz, aura précisément pour mesure la quantité de mouvement qu'elle est susceptible de fournir pendant l'unité de temps, de sorte qu'en la désignant par P on aura

$$P = \frac{nmu^2}{3h}.$$

En appelant α la surface de la base du cylindre et p la pression rapportée à l'unité de surface, on aura

$$p = \frac{nmu^2}{3\alpha h},$$

et en appelant v le volume αh,

$$p = \frac{nmu^2}{3v} \quad \text{ou} \quad pv = \frac{nmu^2}{3},$$

formule qui ne diffère de celle de M. Krönig que par un facteur constant.

On sait d'autre part qu'en appelant T la température absolue comptée à partir de — 273 degrés, et k une constante, on a

$$pv = kT.$$

Digitized by Google

Il suit de là que la force vive nmu^2 due au mouvement de translation des molécules, est proportionnelle à la température absolue, ainsi que M. Krönig l'avait démontré en supposant que ce mouvement de translation était le seul mouvement des molécules.

On peut déduire des formules précédentes la valeur absolue de la vitesse moyenne de translation des molécules d'un gaz quelconque à une température donnée. On a en effet

$$u^2 = \frac{3pv}{nm},$$

ou, en appelant q le poids du gaz, g l'intensité de la pesanteur,

$$u^2 = \frac{3gpv}{q},$$

formule qui ne contient que des quantités numériquement déterminables. En désignant par ρ la densité du gaz rapportée à celle de l'air à la température de congélation de l'eau, mettant dans la formule les valeurs connues du poids du litre d'air et de l'intensité de la pesanteur, et prenant pour p la pression normale d'une atmosphère, on obtient la valeur suivante de u exprimée en mètres,

$$u = 485\sqrt{\frac{T}{273\rho}},$$

ce qui donne

Pour l'oxygène.....	$u = 461^m$,
Pour l'azote.....	$u = 492^m$,
Pour l'hydrogène...	$u = 1844^m$.

Il est bon de se rappeler que ces nombres ne représentent que les vitesses moyennes, et que les vitesses réelles qui changent d'une molécule à l'autre peuvent en différer beaucoup, soit en plus, soit en moins.

L'état solide et l'état liquide sont faciles à concevoir dans

Digitized by Google

le même ordre d'idées. Les molécules d'un solide et d'un liquide sont sans cesse en mouvement comme celles d'un gaz, et ce mouvement constitue ce que nous appelons *la chaleur;* mais dans les solides le mouvement est purement vibratoire et n'a lieu qu'autour de positions fixes d'équilibre. Ce mouvement peut d'ailleurs affecter les éléments des molécules ou les molécules entières, et dans ce dernier cas il peut être une rotation autour du centre de gravité aussi bien qu'une oscillation du centre de gravité. Dans les liquides, les molécules n'ont plus de position fixe; elles peuvent donc non-seulement osciller ou tourner sur elles-mêmes, mais encore glisser les unes sur les autres, toutefois sans se séparer, de manière que le volume demeure constant, même en l'absence d'une pression extérieure. Dans l'état gazeux, au contraire, l'amplitude du mouvement est devenue telle, que les molécules sont soustraites à l'influence de leur attraction réciproque, et se meuvent en ligne droite suivant les lois ordinaires du mouvement.

Le phénomène de l'évaporation mérite une attention spéciale. Les molécules qui se trouvent à la surface d'un liquide sont animées de mouvements du même genre que les molécules de l'intérieur, mais il y a cette différence qu'une molécule de l'intérieur en s'éloignant de certaines molécules voisines se rapproche de certaines autres, de manière à rester toujours soumise à l'influence de l'attraction moléculaire, tandis qu'il est fort possible que certaines molécules de la surface sortent de la sphère où cette attraction est sensible, et continuent leur mouvement dans l'espace supérieur au liquide, tout comme les molécules d'un gaz. Supposons d'abord cet espace vide et limité. Les molécules du liquide s'y meuvent en ligne droite et avec une vitesse constante, tant qu'elles ne viennent pas à rencontrer les parois ou d'autres molécules. Or il est évident que l'on doit regarder la surface du liquide comme une paroi, mais comme une paroi d'une espèce particulière, douée de la

Digitized by Google

propriété d'attirer et de réunir à la masse liquide générale les molécules qui viennent la rencontrer. Par conséquent, en même temps que cette paroi émet sans cesse des molécules dans l'espace supérieur, elle en condense d'autres, et l'on conçoit qu'un équilibre doive s'établir entre deux actions contraires. Cet état d'équilibre dépend de la température, et à une température donnée il est caractérisé par la constance de la densité et de la force élastique de la vapeur. Si les parois solides qui limitent l'espace supérieur au liquide exercent une attraction sensible sur les molécules de la vapeur, elles en déterminent la condensation, et au bout de quelque temps elles sont recouvertes de liquide, de manière à jouer le même rôle que la surface du liquide. La présence d'un gaz dans l'espace qui surmonte le liquide n'exerce pas d'influence sensible sur les phénomènes. Les molécules du gaz n'occupent en effet qu'une très-petite partie de l'espace, et leur présence ne peut modifier que très-peu les conditions de l'équilibre. La pression du gaz exerce seulement sur les phénomènes de l'ébullition une influence tout à fait indépendante de celle qui vient d'être signalée, et sur laquelle il est inutile d'insister.

On conçoit qu'une évaporation soit possible à la surface des solides comme à la surface des liquides, mais rien n'indique qu'elle soit nécessaire.

M. Clausius considère ensuite l'absorption et le dégagement de chaleur qui accompagnent le changement d'état et de volume des corps. Du moment que l'on considère la chaleur comme la force vive des molécules des corps, il suffit de tenir compte de la relation qui existe entre la force vive et le travail pour se rendre compte de tous les phénomènes. En particulier, si l'on fait communiquer ensemble deux vases qui contiennent un même gaz avec des pressions différentes, ou dont l'un est même entièrement vide, le mélange des gaz n'est accompagné d'aucun travail, du moins si le gaz est un gaz parfait, dans lequel l'influence

Digitized by Google

des forces moléculaires est insensible. Il n'y a donc aucune variation de la force vive, et par suite de la chaleur contenue dans les gaz. Néanmoins, comme le gaz dont la pression est la moins forte se comporte par rapport à l'autre comme un piston mobile, il y aura dans les deux vases des variations opposées de température.

M. Clausius s'occupe enfin de la loi des combinaisons gazeuses établie par Gay-Lussec, qui consiste comme l'on sait dans la simplicité des rapports de volume suivant lesquels les gaz s'unissent les uns avec les autres, et forment de nouveaux composés gazeux. Si l'on admet que des volumes égaux de gaz simples contiennent des nombres égaux d'atomes, il résulte de la formule des pressions donnée plus haut que les atomes de deux gaz simples à la même température et à la même pression possèdent la même force vive, si l'on n'a égard qu'au mouvement de translation. Il paraît difficile au premier abord d'étendre cette règle aux gaz composés, car si l'on considère par exemple le bioxyde d'azote formé d'un volume d'oxygène et d'un volume d'azote sans condensation, il semble qu'un volume de ce gaz ne doit contenir que la moitié du nombre d'atomes contenu dans un volume égal d'un gaz simple. Pour échapper à cette difficulté, M. Clausius admet que la molécule d'un gaz simple résulte pour ainsi dire de la combinaison de plusieurs atomes identiques, et que dans la combinaison de deux gaz simples il n'y a pas agrégation de deux ou plusieurs molécules entières, mais échange réciproque d'une partie des éléments entre deux molécules des deux gaz. On peut concevoir de cette façon que les gaz composés contiennent sous le même volume le même nombre de molécules que les gaz simples, et par conséquent les molécules de tous les gaz, tant simples que composés, possèdent à la même température la même force vive, si l'on n'a égard qu'au mouvement de translation (1).

(1) L'hypothèse de M. Clausius n'est pas nouvelle. Plusieurs chimistes ont

Digitized by Google

Le Mémoire de M. Clausius se termine par la détermination du rapport qui existe entre la force vive due au mouvement de translation des atomes et la force vive totale, en d'autres termes, la chaleur totale contenue dans un gaz. Soit H la quantité totale de chaleur contenue dans un poids q de gaz, c la chaleur spécifique à volume constant, rapportée au poids, T la température absolue (comptée à partir de — 273 degrés), p la pression, v le volume du gaz, et A l'inverse de l'équivalent mécanique de la chaleur; il est facile de voir que les variations $d\mathrm{H}$ de la quantité de chaleur résultant d'un accroissement dv de volume et d'un accroissement $d\mathrm{T}$ de température sera

$$d\mathrm{H} = qcd\mathrm{T} + \mathrm{A}pdv.$$

Si l'on admet que le gaz se dilate librement sous pression constante, on aura

$$pv = k\mathrm{T},$$
$$pdv = kd\mathrm{T},$$
$$dv = \frac{v}{\mathrm{T}}\,d\mathrm{T}.$$

et, par suite,

$$d\mathrm{H} = qcd\mathrm{T} + \frac{\mathrm{A}pv}{\mathrm{T}}\,d\mathrm{T}.$$

Comme d'ailleurs, en appelant c' la chaleur spécifique sous pression constante, on a évidemment dans le cas actuel

$$d\mathrm{H} = qc'\,d\mathrm{T},$$

il vient

$$qc'\,d\mathrm{T} = qcd\mathrm{T} + \frac{\mathrm{A}pv}{\mathrm{T}}\,d\mathrm{T},$$

éjà considéré le chlore et l'hydrogène, par exemple, comme des gaz à molé-ules doubles, et la formation de l'acide chlorhydrique comme une sorte de louble décomposition, telle qu'une molécule d'hydrogène et une molécule de chlore nt naissance à deux molécules d'acide chlorhydrique. M. Laurent dan ode de Chimie, M. Gerhardt dans son *Traité de Chimie organique*, loppé des idées de ce genre. (V.)

Digitized by Google

d'où

$$\frac{q(c'-c)}{A}\,T = pv.$$

Enfin de l'équation $dH = qc\,dT$, on conclut

$$H = qcT,$$

et en mettant dans cette formule la valeur de qT déduite de la précédente, on obtient

$$\frac{H}{A} = \frac{c}{c'-c}\,pv.$$

Le premier membre de cette équation n'est autre chose que la chaleur totale du gaz multipliée par l'équivalent mécanique de la chaleur, c'est-à-dire la force vive totale des molécules du gaz. D'autre part on a trouvé plus haut, par la force vive due au mouvement de translation des molécules, l'expression $\frac{3}{2}pv$. Le rapport de ces deux quantités de force vive est donc

$$\frac{3}{2}\left(\frac{c'}{c}-1\right).$$

Si l'on admet pour les gaz simples que la valeur de $\frac{c'}{c}$ est égale à 1,421, la valeur du rapport cherché devient 0,6315.

Digitized by Google

JOURS DU MOIS.	9 HEURES DU MAT. Temps vrai. Barom. à 0°.	Thermom. extér. fixe et corr.	HYGROMÈTRE.	MIDI. Temps vrai. Barom. à 0°.	Thermom. extér. fixe et corr.	HYGROMÈTRE.	3 HEURES DU SOIR. Temps vrai. Barom. à 0°.	Thermom. extér. fixe et corr.	HYGROMÈTRE.	6 HEURES DU SOIR. Temps vrai. Barom. à 0°.	Thermom. extér. fixe et corr.	HYGROMÈTRE.	9 HEURES DU SOIR. Temps vrai. Barom. à 0°.	Thermom. extér. fixe et corr.	HYGROMÈTRE.	MINUIT. Temps vrai. Barom. à 0°.	Thermom. extér. fixe et corr.	HYGROMÈTRE.	THERMOM. Maxima.	THERMOM. Minima.	ÉTAT DU CIEL A MIDI.	VENTS A MIDI.
1	747,87	9,1	79	748,75	11,7	67	744,89	12,4	55	744,03	10,8	69	742,79	9,2	81	741,01	7,9	95	13,3	4,7	Nuageux ; rares éclairc.	S. faible.
2	748,06	11,2	74	749,35	13,4	65	743,88	12,5	67	744,54	10,8	79	745,01	7,8	90	745,30	6,8	92	15,1	7,7	Nuageux.....	S.O as for
3	748,81	10,5	72	750,40	12,7	60	750,39	12,5	67	752,05	10,8	72	753,07	8,8	90	753,34	8,8	91	14,4	6,4	Couvert ; éclaircies....	S.O. faible
4	754,42	10,6	79	753,73	13,3	67	753,04	14,1	71	753,15	13,7	80	752,86	11,9	86	752,76	10,7	90	15,3	8,0	Couvert.....	S E. faible.
5	749,77	11,5	79	748,34	14,3	67	747,38	15,9	58	747,36	14,6	66	747,28	12,8	81	746,60	11,5	89	16,5	9,2	Couvert.....	S.S.E. t.-fa
6	748,71	13,1	88	749,83	12,7	90	751,05	13,3	80	752,35	13,5	80	753,44	11,8	93	754,65	11,0	95	14,0	11,5	Couvert ; pluie.....	O N.O. t.-fa
7	756,86	13,3	80	757,20	14,2	71	757,31	14,3	68	757,61	13,7	73	758,10	11,8	84	758,10	9,5	95	15,3	10,0	Eclaircies	O. assez fo
8	757,30	9,8	86	756,19	15,8	62	754,75	16,4	47	753,89	14,8	65	753,35	12,4	75	752,08	9,8	85	17,2	6,5	Nuageux.....	S.E.faible
9	748,86	9,2	89	747,64	10,0	90	747,45	12,9	72	748,58	11,7	79	745,50	8,6	92	744,93	7,4	96	13,2	7,9	Couvert ; nimbus	N. faible.
10	744,02	11,1	72	742,75	15,5	61	741,12	17,3	49	741,04	11,5	72	741,75	11,2	87	742,06	9,6	92	18,1	5,0	Beau ; qq. nuages.....	E.S.E. fail
11	743,59	11,2	80	743,56	13,7	64	744,16	10,1	71	746,04	7,2	81	748,14	6,2	82	748,83	4,6	85	14,6	3,2	Couv. ; qq. g. de pluie..	S.O. faible.
12	747,19	8,1	83	745,90	9,4	75	745,43	7,2	69	744,53	7,4	69	742,26	5,7	81	738,38	6,0	92	9,5	2,5	Couvert ; nimbus.....	O. ass. for
13	737,17	5,7	70	737,52	7,7	62	738,36	1,8	87	739,30	5,0	81	740,09	3,9	85	740,92	3,2	87	8,6	3,8	Nuageux.....	O.S.O tr.-fo
14	749,50	5,8	66	748,53	7,8	61	744,34	7,2	62	745,52	4,8	81	746,75	4,2	87	747,04	3,0	89	9,3	2,2	Très-nuag ; éclaircies..	O.S O. fait
15	749,58	4,1	87	749,58	8,2	72	749,47	9,7	53	750,71	7,3	79	751,53	4,3	89	752,34	4,6	90	10,7	2,9	Couvert ; pluie.....	O.S.O. faib
16	755,00	7,4	83	755,11	9,4	71	755,04	11,6	58	756,05	8,3	80	756,16	7,9	92	757,82	7,1	93	11,9	3,5	Nuag. ; qq éclaircies...	S. ass. faib
17	759,62	10,7	70	759,21	13,5	67	758,28	14,9	59	758,53	14,0	59	758,64	10,6	70	759,04	8,6	76	15,2	5,6	Eclaircies ; cumulus...	S. O. faible
18	757,30	15,5	59	757,03	17,9	50	755,11	19,5	42	754,37	18,9	43	754,47	14,7	57	754,66	12,1	65	19,7	5,9	Beau.....	S.O. faible
19	757,34	18,0	60	757,87	20,9	52	758,12	21,7	47	758,81	20,7	47	760,44	16,9	60	761,40	12,9	66	22,3	8,6	Beau ; vapeurs.	E.S.E. fait
20	762,73	16,7	59	762,72	19,9	50	761,56	20,9	49	762,02	17,3	65	762,27	14,3	67	762,99	11,9	65	21,4	10,3	Beau ; queiq. nuages..	N. faible.
21	763,31	13,0	59	763,29	15,1	60	762,16	15,5	47	762,59	13,1	51	763,66	10,3	67	763,07	8,2	79	16,7	8,2	Nuageux.....	N.N.O.as.fo
22	761,06	8,6	75	759,05	11,2	63	757,62	10,9	66	756,79	9,8	77	755,07	9,1	92	754,16	9,0	97	12,8	7,2	Couvert.....	N.O. faible
23	754,37	8,5	64	753,81	9,2	60	753,59	7,6	75	753,67	6,8	67	754,80	5,2	70	755,34	2,3	75	9,4	6,7	Couvert.....	N.N.O. for.
24	755,98	4,6	67	755,65	6,6	65	754,49	9,1	50	753,72	6,6	59	753,19	5,4	72	752,37	4,2	80	8,9	4,0	Couvert.....	N. as. fort.
25	750,75	9,0	63	749,61	8,9	54	748,63	10,1	48	747,32	9,0	49	746,55	6,6	62	745,89	3,9	75	11,4	3,3	Couvert.....	S. faible.
26	748,47	5,2	62	748,87	5,1	55	750,14	3,8	61	751,33	3,0	84	752,56	3,4	68	753,59	2,9	68	5,6	3,0	Couvert.....	N.N.E.tr.fo
27	753,94	3,6	69	753,96	4,4	65	753,98	4,6	67	754,32	4,8	71	754,05	4,6	74	755,27	3,9	75	5,0	2,1	Couvert.....	N.N.O as.fo
28	756,33	5,0	60	756,02	6,6	53	755,92	7,0	52	756,80	4,8	56	756,76	5,7	67	757,37	4,9	74	»	3,2	Couvert.....	N.N O.as.fo
29	756,72	6,4	61	756,47	7,5	48	756,06	7,5	51	756,42	6,9	63	757,01	6,0	72	756,85	5,4	76	»	»	Couvert.....	N.N.E as. fo
30	757,01	6,3	74	756,88	7,8	62	757,13	8,8	51	757,40	7,8	65	757,98	7,0	65	757,98	5,8	75	»	»	Couv. ; qq. g. de pluie..	N.N.O. fai

Quantité de pluie en millimètres tombée pendant le mois : Cour, 56mm,66 ; terrasse, 55mm,14.

Digitized by Google

TABLE DES MATIÈRES.

TOME L. (3e Série.)

pages.

Recherches sur le tungstène et ses composés; par M. ALFRED RICHE..... 5

Observations et expériences sur l'emploi de l'iodure de potassium comme réactif de l'ozone; par M. S. CLOEZ..... 80

Recherches expérimentales et théoriques sur les figures d'équilibre d'une masse liquide sans pesanteur; par M. J. PLATEAU..... 97

Note pour servir à l'histoire du colchique d'automne (*Colchicum autumnale*, L.); par M. L. OBERLIN..... 108

Observations météorologiques du mois de février 1857.... 128

Recherches sur la composition des œufs et des muscles dans la série des animaux; par MM. A. VALENCIENNES et FREMY. 129

Note sur la tétartoédrie non superposable; par M. PASTEUR.. 178

Mémoire sur la torsion; par M. G. WERTHEIM..... 195

Sur la fermentation alcoolique; par M. MARCELLIN BERTHELOT. 322

Transformation de la mannite et de la glycérine en un sucre proprement dit; par M. MARCELLIN BERTHELOT..... 369

Note sur le soufre mou des hyposulfites; par M. MARCELLIN BERTHELOT..... 376

Observations météorologiques du mois de mars 1857..... 384

Digitized by Google

Pages.

Mémoire sur la torsion (suite); par M. G. WERTHEIM..... 385

Recherches sur une nouvelle classe d'alcools; par MM. A.-W. HOFMANN et AUG. CAHOURS..... 432

Études sur les machines magnéto-électriques; par M. F.-P. LE ROUX..... 463

Remarques à l'occasion d'un Mémoire de M. *Mayer*, inséré dans le cahier de juin 1857 des *Annales de Chimie et de Physique*; par M. BOUSSINGAULT..... 479

Note sur la construction d'un prisme biréfringent propre à servir de polariseur; par M. DE SENARMONT..... 480

Observations météorologiques du mois d'avril 1857..... 508

Table des matières du tome L..... 509

Mémoires sur la Chimie publiés à l'étranger.

Extraits par M. Adolphe WURTZ.

Sur l'acide méthionique; par M. A. STRECKER..... 115

Sur la sulfobenzide; par M. GERICKÉ..... 116

Sur les formules de quelques amides et de quelques urées; par M. WELTZIEN..... 119

Sur la constitution et la nature chimique des hydrogènes carbonés; par M. H.-L. BUFF..... 180

Recherches sur le tantale; par M. H. ROSE..... 181

Recherches sur le tantale; par M. R. HERMANN..... 184

Sur les rapports de l'acide phosphorique à l'azote dans les graines des céréales; par M. MAYER..... 185

Formation du formiate d'éthyle par l'acide oxalovinique; par M. CHURCH..... 188

Sur le cobaltate de potasse; par MM. SCHWARZENBERG et PEBAL..... 378

Digitized by Google

Pages.
Sur un nouvel alcaloïde dans la ciguë; par M. Th. Wertheim. 379
Sur les produits de l'oxydation du sucre de lait dans des liqueurs alcalines; par MM. Boedecker et Struckmann... 481
Sur la huanoquine, nouvel alcaloïde du quinquina; par M. A. Erdmann..... 482
Sur une combinaison cristallisable de l'acide chromique avec l'oxyde de cuivre; par M. F. Droege..... 484
Sur un nouveau mode de préparation du phosphure d'azote; par M. Pauli..... 484
Préparation de l'acide pyrogallique; par M. Liebig 485
Sur l'identité de la phaséomannite avec l'inosite; par M. Vohl. 485
Sur le bisulfure de bismuth et sur le tri-iodure de bismuth; par M. Schneider 487
Sur la constitution du fulminate de mercure; par M. A. Kékulé..... 488
Préparation de l'acide molybdique cristallisé à l'aide du molybdène sulfuré; par M. Woehler..... 491

Mémoires sur la Physique publiés à l'étranger.

Extraits par M. VERDET.

Mémoire sur la mesure des longueurs d'ondulation au delà du violet; par M. Esselbach..... 121
Sur les actions diamagnétiques; par M. Reich..... 123
Note sur la décomposition polaire de l'eau effectuée par l'électricité ordinaire et l'électricité atmosphérique; par M. Andrews..... 124
Note sur la stratification de la lumière électrique; par M. Van der Willigen..... 126
Note sur le magnétisme des barreaux d'acier; par M. Wiedemann..... 188

Digitized by Google

Pages.

Mémoire sur la conductibilité électrique des métaux des alcalis et des terres alcalines; par M. MATTHIESSEN..... 192

Remarques sur la nature de la chaleur et la constitution des fluides élastiques; par M. JOULE..... 381

Principes d'une nouvelle théorie des gaz; par M. KROENIG.. 491

Mémoire sur la nature du mouvement appelé *chaleur*; par M. CLAUSIUS..... 497

PLANCHES.

Pl. I. — Mémoire sur la torsion.

FIN DE LA TABLE DU TOME CINQUANTIÈME.

PARIS. — IMPRIMERIE DE MALLET-BACHELIER,
Rue du Jardinet, n° 12.

Digitized by Google

sion... par M

ig. 5.

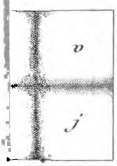


Fig. 7.

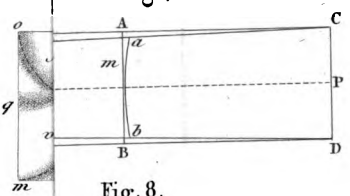


Fig. 8.

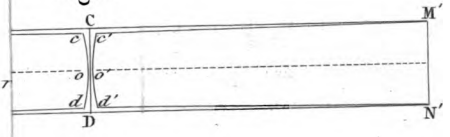


Fig. 10.

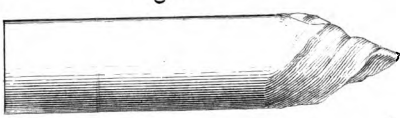
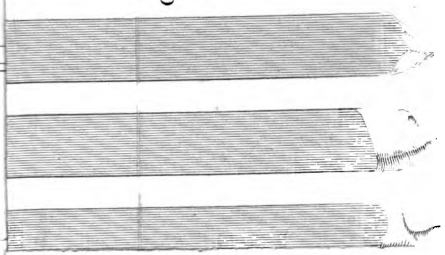


Fig. 11.



L'

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY

ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS
R L

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

MAY 2 6 19

Digitized by Google